

# **Sistema de Posicionamento Multifacetado de Elevado Desempenho e Baixo Custo**

*Vitor Hugo Ribeiro Lopes*

**Dissertação de Mestrado**

Orientadores: Prof. João Manuel R. S. Tavares

Engº. Jorge Manuel Matos Reis



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**  
**Ramo de Automação**

2015/2016

*À minha família*

## Resumo

A construção de um sistema ótico, por mais simples que este seja, envolve sempre um grande investimento financeiro. Como tal, é inviável para muitas instituições, como uma escola secundária ou qualquer outra entidade de ensino, com baixo financiamento, a compra e montagem de um sistema ótico. Além do mais, um sistema ótico, após montado, depois de um processo de alinhamento quase sempre demorado, tem reduzida ou mesmo nenhuma alteração posicional adequada às necessidades.

O presente trabalho teve, como objetivo fundamental, o desenvolvimento de uma solução que contornasse os aspetos mais desfavoráveis dos sistemas óticos, em geral, existentes atualmente no mercado. Como tal, são apresentadas três soluções, sendo que a solução final acaba por ser a mais interessante, com peça de forma única, é possível a construção de um suporte universal, para qualquer componente ótico, sem qualquer limite imposto pela imaginação. De realçar os seis graus de liberdade, em cada conjunto posicional, extremamente intuitivos, permitindo a utilização destes por parte de qualquer utilizador. Existe ainda a possibilidade da eliminação de vibrações externas, montando todo o sistema ótico sobre uma base de construção comum.

A viabilidade e funcionalidade dos suportes, construídos a partir de uma peça com uma forma única, foi testada, construindo um interferómetro. Os resultados permitem concluir que, face ao atualmente existente no mercado, esta solução acaba por ser mais interessante em termos económicos bem como em relação ao tempo necessário para a montagem e alinhamento de todo um sistema ótico.

## Abstract

The construction of an optical system, no matter how simple it is, always involves a large financial investment. As such, it is impracticable for a lot of institutions, as high school or any other educational entity with low financing, the purchase and installation of an optical system. Furthermore, an optical system, once assembled and often with a time-consuming alignment, has little or even no proper positional change to the needs.

The present work has as a fundamental goal the development of a solution that would bypass the negative aspects of optical systems generally available today. As such, three solutions are presented, and the final solution turns out to be the most interesting, being a piece with a unique shape, it is possible to construct a universal mounting for any optical component, without any restriction imposed by the imagination. It is important to note the six degrees of freedom, they are very intuitive, which can be obtained in each of the supports enabling their use by any user. It is possible to eliminate external vibration, assembling the optical system up the same axis.

The viability and functionality of the holders, constructed from a piece with a single form, was tested by constructing an interferometer. The results show that, compared to the currently existing on the market, this solution turns out to be more interesting in economic terms and in relation to the time needed for mounting and alignment of an entire optical system.

## Agradecimentos

Na realização desta dissertação, contei com o apoio de diversas pessoas, sem as quais este trabalho não teria sido possível de realizar.

Ao Engenheiro Jorge Reis e ao Professor João Tavares, meus orientadores, agradeço toda a disponibilidade ao longo deste percurso, bem como todo o conhecimento transmitido e a motivação essencial para a conclusão, com sucesso, deste trabalho. Agradeço, também, todo o empenho, de ambos, na leitura deste documento, corrigindo-o e tornando-o, sem qualquer dúvida, com um maior rigor científico.

A todos os meus colegas de curso, que me acompanharam neste percurso, com entreaajuda e amizade.

Ao Sr. António Ramalho e Sr. Joaquim Silva, por toda a ajuda e simpatia.

A toda a minha família que, ao longo de todos estes anos, me preencheu com carinho, proporcionando-me as melhores condições para que alcançasse, com sucesso, a minha formação.

# Índice

Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	2
1.4. Contribuições Alcançadas.....	3
Estado da arte .....	4
2.1. Introdução .....	4
2.2. Mesas óticas .....	4
2.3. Componentes optomecânicos.....	5
2.3.1. Guias de fixação vertical roscada .....	5
2.3.2. Suportes para guias verticais.....	6
2.3.3. Bases para suportes de guias verticais .....	6
2.3.4. Bases padrão.....	7
2.3.5. Bases magnéticas .....	7
2.3.6. Bases ajustáveis.....	8
2.3.7. Bases com fixação usando braçadeira de aperto .....	8
2.3.8. Bases giratórias e magnéticas com suporte para guias verticais .....	10
2.3.9. Garfos de fixação e respetivos adaptadores.....	10
2.3.10. Retentores de posição da base .....	12
2.3.11. Sistemas de gaiola .....	12
2.3.12. Suportes óticos fixos.....	13
2.3.12.1. Suportes para lentes fixo não ajustáveis .....	13
2.3.12.2. Suportes para lentes com diâmetro ajustável.....	13
2.3.12.3. Suportes em V com altura regulável.....	14
2.3.12.4. Plataformas compactas para montagem em guia vertical .....	15
2.3.13. Suportes óticos cinemáticos .....	15
2.3.13.1. Suportes cinemáticos para componentes óticos multi-eixo .....	15
2.3.13.2. Suportes para espelhos.....	16
2.3.14. Plataformas multi-eixos.....	18
2.4. Sumário.....	19
3. Soluções Desenvolvidas .....	20
3.1. Introdução .....	20
3.2. Primeira Solução.....	20
3.2.1. Ligação entre a peça inferior e a peça central .....	21
3.2.2. Ligação entre a peça central e a peça superior .....	22
3.2.3. Solução para furos roscados .....	22
3.2.4. “Garfo” para fixação dos componentes.....	23
3.2.5. Fixação do suporte ao exterior .....	23
3.2.6. Vantagens.....	24
3.2.7. Desvantagens.....	24
3.3. Segunda Solução.....	25
3.3.1. Marcação de furos e medidas.....	25
3.3.2. Equipamentos e cuidados necessários no trabalho em acrílico .....	26
3.3.3. Vantagens da utilização do acrílico na construção do suporte .....	26
3.3.4. Desvantagens do trabalho com acrílico .....	27
3.4. Terceira Solução (Solução Final) .....	27
3.4.1. Peça única- a base da solução.....	28
3.4.2. Interligação entre peças .....	29
3.4.3. Encastramentos para porcas.....	29
3.4.4. Anilhas e respetiva função.....	30
3.4.5. Fixação de componentes.....	30
3.4.6. Fixação do sistema de suporte ao exterior .....	30
3.4.7. Eliminação de vibrações.....	31
3.4.8. Desvantagens.....	31

3.5. Sumário.....	31
4. Demonstração de Funcionamento .....	32
4.1. Introdução .....	32
4.2. Interferômetro de Michelson.....	32
4.3. Construção de um interferômetro de raiz .....	33
4.3.1. Fonte de luz.....	33
4.3.2. Alimentação do sistema.....	33
4.3.3. Espelho móvel .....	34
4.3.4. Recetor dos dois diferentes feixes .....	36
4.3.5. Base de apoio do sistema.....	36
4.3.6. Discussão de testes.....	37
4.3.7. Custo de todo o sistema .....	38
4.4. Sumário.....	38
5. Conclusões e Trabalhos Futuros .....	39
5.1. Conclusões Finais.....	39
5.2. Trabalhos Futuros .....	40
Referências .....	41
ANEXO A: Sangramento de um parafuso.....	44
ANEXO B: Encastramento para porcas detalhado .....	45
ANEXO C: Peça única detalhada.....	46
ANEXO D: Desenho de definição do suporte universal.....	47
Lista de peças .....	47
ANEXO E: Vista explodida do suporte .....	49

## Índice de Figuras

Figura 1- Mesa ótica (3m x 1.5m x 310mm) apoiada em suportes isoladores de vibrações com 600 mm de altura. ....	5
Figura 2- Guia de fixação vertical roscada (M4) com diversos comprimentos.....	5
Figura 3- Suporte para guias verticais com 76,2 mm de comprimento e diâmetro interior de 12,7 mm. ....	6
Figura 4- Suporte para guias verticais com translação vertical. ....	6
Figura 5- Suporte de guias verticais montado na respectiva base recorrendo a um parafuso. ....	6
Figura 6- Dois exemplos de bases padrão. ....	7
Figura 7- Bases magnéticas com respetivos ímãs colocados na sua parte inferior.....	7
Figura 8- Base ajustável que permite posicionamento horizontal. ....	8
Figura 9- Mecanismo de fixação usando uma braçadeira atuada por um parafuso M10. ....	9
Figura 10- Furo central atravessa a base permitindo a montagem de guias verticais e/ou respetivos suportes com contato sobre a superfície da mesa ótica. ....	9
Figura 11- Base giratória com ímãs na sua base inferior. ....	10
Figura 12- Adaptador que permite a fixação da guia vertical ou respetivo suporte recorrendo a um garfo.....	10
Figura 13- Garfo de fixação.....	11
Figura 14- Exemplo de aplicação do garfo de fixação e respetivo adaptador. ....	11
Figura 15- Retentor de posição.....	12
Figura 16- Sistema de gaiola. Preço varia consoante os componentes utilizados no sistema..	12
Figura 17- Conjunto de suportes para lentes não ajustáveis com vários diâmetros. ....	13
Figura 18- Suporte para lentes com diâmetro ajustável montado numa guia vertical.....	14
Figura 19- Suporte em V com altura regulável. ....	14
Figura 20- Plataforma compacta para montagem em guia vertical e respetivos adaptadores..	15
Figura 21- Suporte cinemático para componentes óticos de 2, 3 e 5 eixos de posicionamento, respetivamente. ....	16
Figura 22- A abertura central permite a fixação de outros componentes óticos, para além das lentes simples, com o recurso a um suporte auxiliar adequado. ....	16
Figura 23- Suporte cinemático para espelhos circulares e retangulares, respetivamente.....	17
Figura 24- Suporte tipo gimbal.....	17
Figura 25- Suportes com ajustadores piezoelétricos e respetivos atuadores. ....	18



Figura 26- Plataforma multi-eixo com posicionamento segundo seis eixos. ....	18
Figura 27- Modelização da primeira solução em SolidWorks. ....	20
Figura 28- A utilização de um torno mecânico permitiu a abertura de duas ranhuras no parafuso. ....	21
Figura 29- Solução utilizando molas (destacadas na figura com o número 1), entre as duas anilhas para redução de folga na figura da esquerda; ligação completa da peça inferior à peça central na figura da direita. ....	21
Figura 30- Ligação entre a peça central e a peça superior (foto invertida). ....	22
Figura 31- Porcas inseridas por calor nos respetivos encastramentos. ....	22
Figura 32- Mecanismo para fixação de componentes óticos. ....	23
Figura 33- Magnetes de neodímio-ferro-boro colados na peça inferior. ....	23
Figura 34- Suporte montado fixando um espelho de superfície. De realçar as inclinações possíveis de alcançar que ultrapassam qualquer necessidade que o utilizador possa exigir. ...	24
Figura 35- Tentativa de replicação em acrílico. De realçar a dificuldade de obter peças minimamente circulares bem como a dificuldade de marcação dos furos. ....	25
Figura 36- Suporte construído, inteiramente, em acrílico. ....	25
Figura 37- Peças com marcação dos respetivos furos e dimensões. ....	26
Figura 38- O aspeto da peça antes (figura da esquerda) e após acabamento final (figura da direita). ....	26
Figura 39- Furos enviesados numa base em acrílico. ....	27
Figura 40- Peças desenhadas em SolidWorks (M3, M4 e M6, respetivamente). ....	28
Figura 41- Diferente coloração das peças que permite ao utilizador a montagem de um suporte de uma forma rápida e intuitiva. ....	28
Figura 42- Exemplo de um suporte e dos diferentes tipos de interligação entre as peças. ....	29
Figura 43- Exemplificação da fixação de uma porca. ....	30
Figura 44- Interferómetro de Michelson. ....	32
Figura 45- Características do laser utilizado no interferómetro. ....	33
Figura 46- Plataforma linear com micrómetro da Newport, peça adaptadora da ThorLabs e parafuso de fixação da Melles Griot. ....	34
Figura 47- Na esquerda, uma lente removida de um leitor de CD-ROM. Na direita, o produto final, com a lente substituída por um espelho. ....	34
Figura 48- Circuito utilizado para acionar as bobinas da lente de CD-ROM, desenhado no software Eagle. ....	35
Figura 49- Circuito eletrónico, ligado ao motor, de forma a testar o potenciómetro. ....	35
Figura 50- Sistema montado sobre uma tampa metálica, de uma torre de um computador fixo. ....	36
Figura 51- Tampa apoiada numa mesa de madeira. De realçar o fato da superfície inferior da tampa não ser uniforme e se deformar. ....	36
Figura 52- Plataforma fixa usando dois suportes. ....	37

Figura 53- Solução um na figura da esquerda. A figura da direita apresenta a solução dois, constituída unicamente por suportes, usando a peça única apresentada neste documento.....	37
Figura 54- Padrão de interferência obtido com o interferómetro montado. ....	38

## Introdução

A ótica e a sua aplicabilidade remontam a 750 AC com criação da primeira lente, denominada por lente de Nimrud, no império Assírio. Apesar de esta lente ter sido encontrada perfeitamente polida, não existem provas que o povo assírio a usasse para ampliação ou para produção de fogo, sendo que o mais provável seja que esta tenha sido usada apenas para decoração [1].

No século 20, a descoberta do primeiro laser, mais tarde, aliado ao desenvolvimento computacional, levaram a uma revolução na ótica, surgindo a chamada ótica moderna. Atualmente, a ótica pode ser considerada um importante ramo da física, em constante crescimento e com elevada aplicabilidade em diversas áreas de pesquisa e projetos, inclusive defesa nacional [2].

Inerente a este crescimento, os requisitos para com os sistemas óticos são cada vez mais complexos, exigindo aos fabricantes de componentes óticos e optomecânicos uma grande diversidade, de forma a satisfazerem todas as necessidades dos clientes. Como tal, vários fabricantes, a nível mundial, dispõem de uma enorme variedade de mesas óticas, componentes óticos (espelhos, divisores de feixe, lentes, etc.) e componentes optomecânicos (suportes). Além disso, com clientes a nível mundial, os fabricantes têm que garantir que as dimensões de todos os seus componentes sejam normalizadas, segundo o sistema métrico e/ou imperial.

A grande diversidade de componentes e dimensões, numa larga gama, segundo sistema métrico e/ou imperial obrigam à existência de uma grande diversidade de suportes por forma a permitir a correta integração de qualquer componente ótico num dado sistema mais amplo. Apesar da existência de suportes ajustáveis, que cobrem uma gama de dimensões, para um dado componente, o seu preço torna-os muitas vezes financeiramente inoportunos face aos suportes que apenas conseguem fixar um componente, com uma dimensão específica.

### 1.1. Enquadramento

Um sistema ótico, após montado e quase sempre de demorado alinhamento, tem reduzida ou mesmo nenhuma alteração posicional adequada às necessidades. Apesar de existirem posicionadores cinemáticos, bem como suportes para componentes, com capacidade de movimento, que podem possuir seis graus de liberdade, o utilizador está sempre restrito a um curso bastante reduzido e muitas das vezes o orçamento não permite a aquisição deste tipo de componentes optomecânicos devido ao preço exorbitante. Além disso, se houver a necessidade de deslocar um componente ótico e o respetivo suporte, tem que desenroscar o conjunto da mesa ótica, movê-lo para a posição aproximada imposta pela furação normalizada da base de suporte desejada e voltar a rosca. Este processo acaba por se tornar maçante, durante o processo de alinhamento de um sistema ótico.

Os componentes óticos exigem um componente optomecânico que funcione como suporte que garanta a correta integração num sistema ótico. Além disso, de forma a tornar o sistema minimamente fiável, é necessário que todos os componentes e respetivos suportes sejam montados sobre uma superfície adequada, que permita a correta fixação destes. Desta forma, a construção de um sistema ótico, por mais simples que este seja, envolve sempre um grande investimento financeiro. Como tal, é inviável, por exemplo, para uma escola secundária ou qualquer outra entidade de ensino, com baixo financiamento, a compra e montagem de um sistema ótico que permitiria que os alunos observassem, por exemplo, as propriedades da luz numa aula de Físico-química, tornando a aprendizagem mais intuitiva e didática.

## **1.2. Objetivos**

Na tentativa de colmatar algumas das dificuldades apresentadas anteriormente surgiu o objetivo fulcral desta dissertação, ou seja, o desenvolvimento e construção de um suporte universal de elevado desempenho e de custo reduzido, reutilizando materiais que muitas das vezes são vistos como inúteis. Um dos objetivos fundamentais foi, com a utilização de um conjunto de peças universais e elementos básicos (parafusos, porcas, molas, anilhas), a construção de um suporte para praticamente toda a diversidade de componentes óticos, obtendo assim um suporte universal de muito reduzido custo, fácil montagem e uso intuitivo.

## **1.3. Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação encontra-se estruturada pelos capítulos, estando os restantes capítulos brevemente apresentados a seguir.

No segundo capítulo, são apresentadas as mesas óticas e a grande diversidade de componentes optomecânicos existentes no mercado, que permitem a consumação de qualquer requisito por parte do utilizador, por mais exigente que seja a montagem visada. São apresentados os componentes, juntamente com os preços de alguns destes, por forma a permitir que o leitor tenha uma mais adequada noção acerca do orçamento necessário para a construção de um sistema ótico, de raiz.

No terceiro capítulo, são apresentadas as diferentes soluções, desenvolvidas e construídas ao longo deste trabalho.

O quarto capítulo inclui a demonstração do funcionamento e viabilidade da solução final, previamente apresentada no segundo capítulo, com a construção de um interferómetro de Michelson, nas condições mais adversas.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões e perspetivas para trabalhos futuros.

#### **1.4. Contribuições Alcançadas**

Como principais contribuições obtidas através deste projeto, destacam-se a possibilidade de construção de um suporte universal, de elevada fiabilidade, baixo custo, utilização intuitiva com uma precisão adequada para a utilização, maioritariamente, em escolas e entidades com orçamentos reduzidos.

A peça única permite a criação de suportes, com seis de graus de liberdade, sem qualquer limite imposto pela imaginação, que permitem a correta fixação de qualquer componente ótico. A eliminação de sinais perturbadores (vibrações, por exemplo) pode ser conseguida utilizando uma base comum a todos os suportes.

A elevada mobilidade destes suportes permite uma redução significativa no tempo de montagem e no alinhamento. Esta mobilidade é conseguida devido à utilização de magnetes como solução de fixação à base de montagem. Como tal, é possível o deslizamento do suporte, segundo os dois eixos cartesianos.

## **Estado da arte**

### **2.1. Introdução**

Neste capítulo são apresentadas as mesas óticas juntamente com os principais componentes optomecânicos, elementos essenciais para a construção de um sistema ótico. São apresentados os preços de cada um destes elementos de forma a permitir que o leitor tenha uma mais adequada noção acerca do orçamento necessário para a construção de um sistema ótico, de raiz.

Na última seção deste capítulo é apresentado um sumário.

### **2.2. Mesas óticas**

As primeiras mesas óticas que surgiram eram construídas em granito e apesar de proporcionarem uma superfície suficientemente rígida, o seu peso elevado, aliado à grande dificuldade de fixar componentes na sua superfície tornou-as pouco viáveis. De forma a colmatar estas dificuldades, surgiram as mesas óticas modernas (Figura 1), geralmente construídas com uma superfície superior e inferior metálicas, extremamente finas, ligadas a um núcleo em forma de favo de mel. A superfície superior da mesa ótica está equipada com furos roscados que permitem a fixação e alinhamento de equipamentos óticos, com elevada precisão [3].

Nos dias de hoje, em laboratórios de pesquisa avançada, é muitas vezes necessária a realização de experiências ou de medições num ambiente livre de vibrações. Áreas de pesquisa usando lasers (sistemas óticos), obtenção de imagens de alta resolução, produção de semicondutores e biotecnologia obrigam a que o nível de vibrações existentes no laboratório seja bem inferior ao da percepção do ser humano.

As vibrações existentes no meio ambiente podem provocar nos lasers, componentes de obtenção de imagem, células, etc., um movimento indesejado, conduzindo à obtenção de imagens distorcidas e resultados incertos, que poderão levar a conclusões erradas. Este movimento é dependente da amplitude e frequência das vibrações presentes e terá um maior impacto em experiências mais sensíveis. Como tal, a mesa ótica deve, em geral, ser montada sobre suportes isoladores de vibração ativos, garantindo o isolamento de vibrações na sua superfície, numa vasta gama de frequências. Este isolamento é conseguido através de um sistema pneumático de câmara dupla, que exige uma fonte controlada de ar comprimido [4].



Figura 1- Mesa ótica (3m x 1.5m x 310mm) apoiada em suportes isoladores de vibrações com 600 mm de altura. Preço do conjunto sem VAT: 10.588,44€ [5].

### 2.3. Componentes optomecânicos

Optomecânica é o sub-ramo da física que estuda a interação da radiação eletromagnética (fótons) com sistemas mecânicos, através da pressão de radiação. A pressão de radiação é a pressão exercida numa superfície devido à incidência de uma onda eletromagnética. O termo optomecânica é também utilizado para referenciar todo o tipo de componentes, que permitem a integração de qualquer componente ótico num sistema, tais como, suportes, guias verticais roscadas, posicionadores, etc. Ao longo desta dissertação o termo será utilizado nesse mesmo sentido [6].

Devido à existência de uma grande variedade de componentes óticos, bem como sistemas óticos de elevada complexidade e requisitos específicos, os fabricantes de componentes optomecânicos necessitam de dispor de uma grande diversidade permitindo satisfazer todas as necessidades dos clientes.

De forma a facilitar ao utilizador escolher o sistema de medição que pretender, todos os componentes, bem como as mesas óticas, estão disponíveis com dimensões segundo sistema métrico e/ou imperial.

#### 2.3.1. Guias de fixação vertical roscada

As guias de fixação vertical roscada (Figura 2) permitem a elevação de componentes óticos com grande precisão e a montagem de um elevado número de componentes numa área reduzida. São fabricados em aço inoxidável e estão disponíveis com vários diâmetros e comprimentos.



Figura 2- Guia de fixação vertical roscada (M4) com diversos comprimentos. Preço sem VAT: 4,80€ para guia com comprimento de 25,4 mm e diâmetro de 12,7 mm [7].

### 2.3.2. Suportes para guias verticais

Os suportes para guias verticais permitem que estes sejam integradas num dos tipos de base que serão apresentados de seguida. A guia é introduzida no suporte e é fixa através de um parafuso (Figura 3).



Figura 3- Suporte para guias verticais com 76,2 mm de comprimento e diâmetro interior de 12,7 mm. Preço sem VAT: 14,30€ [8].

Além do suporte previamente apresentado, existem modelos muito semelhantes ao anterior mas que permite a translação vertical da guia. É uma alternativa relativamente barata para aplicações que requerem ajuste em altura sem um grande nível de precisão (Figura 4).



Figura 4- Suporte para guias verticais com translação vertical. Preço sem VAT a partir de 58€ [9].

### 2.3.3. Bases para suportes de guias verticais

Os suportes de guias verticais são montados na base recorrendo, na maioria dos modelos, a um parafuso, tal como é demonstrado na Figura 5. Os restantes furos na base permitem a fixação desta a uma mesa ótica. De seguida são apresentados os vários tipos de bases e as características fundamentais de cada uma destas.

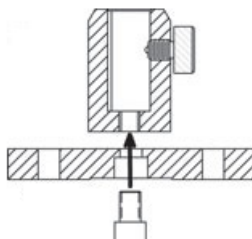


Figura 5- Suporte de guias verticais montado na respetiva base recorrendo a um parafuso [10].



#### 2.3.4. Bases padrão

As bases padrão são, geralmente, as mais utilizadas. São construídas em alumínio e as suas dimensões variam consoante o modelo. O utilizador terá que analisar qual a melhor solução, tendo em conta o/os componente(s) que pretende suportar, a estabilidade requerida e o espaço disponível para a montagem.

Na Figura 6, são apresentadas dois exemplos de bases padrão e é possível observar que estas possuem uma ranhura, que permite ao utilizador a escolha do furo da mesa ótica mais conveniente para fixar a base.



Figura 6- Dois exemplos de bases padrão. Preços sem VAT a partir de 4,68€ [10].

#### 2.3.5. Bases magnéticas

As bases magnéticas apenas diferem das padrão pois possuem, na sua parte inferior, magnetes extremamente fortes como se pode observar na Figura 7.



Figura 7- Bases magnéticas com respetivos magnetes colocados na sua parte inferior. Preços sem VAT a partir de 10,35€ [10].

Os magnetes oferecem a capacidade de fixar temporariamente a base durante o processo inicial de configuração de todo o sistema e permite um fácil e rápido reposicionamento. Além disso, a força de fixação oferecida pelos magnetes é forte o suficiente para evitar qualquer movimento acidental.

A funcionalidade extra destas bases face às padrão só pode ser alcançada quando usadas sobre uma superfície metálica. No entanto, podem ser usadas em superfícies não-metálicas funcionando como uma base padrão.

Quando o processo de posicionamento estiver completo, as bases devem ser aparafusadas a uma mesa ótica (tal como acontece com as bases padrão) ficando, desta forma, permanentemente fixas.

#### **2.3.6. Bases ajustáveis**

De forma a complementar as bases padrão, surgiram as bases ajustáveis que permitem posicionamento horizontal através de um curso ao longo do centro. O parafuso que pode ser observado na Figura 8 permite a fixação dos suportes para guias verticais.



Figura 8- Base ajustável que permite posicionamento horizontal. Preço sem VAT: 20,25€ [10].

Para reposicionar horizontalmente o suporte de guias verticais montado na base é apenas necessário desafixa-lo da base girando-o no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio. De seguida, é possível desliza-lo para a posição desejada e, quando esta for alcançada, o suporte de guias verticais é de novo fixado na base, girando-o, desta vez, no sentido dos ponteiros do relógio.

#### **2.3.7. Bases com fixação usando braçadeira de aperto**

Este tipo de base têm no centro um furo juntamente com uma braçadeira que permitem a integração de guias verticais e dos suportes destas. A braçadeira é atuada por um parafuso M10, colocado lateralmente (Figura 9).



Figura 9- Mecanismo de fixação usando uma braçadeira atuada por um parafuso M10 [10].

O furo central, onde é colocado a guia vertical, com ou sem suporte, atravessa a base de um lado ao outro (Figura 10). Isto permite a montagem com contacto sobre a superfície da mesa ótica. Nas bases padrão, as guias e respetivos suportes são montados sobre a superfície da própria base o que aumenta a altura mínima do eixo ótico e baixa ligeiramente a estabilidade do sistema ótico [10].



Figura 10- Furo central atravessa a base permitindo a montagem de guias verticais e/ou respetivos suportes com contato sobre a superfície da mesa ótica. Preço sem VAT: 27,00€ [10].

Este tipo de bases apresenta ainda uma outra vantagem face às bases padrão pois permite a montagem de guias verticais, sem necessidade de recorrer a um suporte auxiliar.

A fixação destas bases a uma mesa ótica é conseguido, tal como nas bases padrão, através do aparafusamento, utilizando a ranhura existente nestas.

### 2.3.8. Bases giratórias e magnéticas com suporte para guias verticais

As bases giratórias com suporte para guias verticais são uma alternativa que oferece várias características convenientes para uma rápida e fácil montagem. O facto de conterem um suporte para guias verticais, fixo à base, facilita a montagem das guias, sendo apenas necessário a inserção da guia e a respetiva fixação desta.

Além disso, permitem a colocação da base no local desejado e de seguida rodar esta até que esteja alinhada com um furo de montagem conveniente, sobre a mesa ótica.

As bases estão equipadas com ímãs que garantem força de fixação suficiente para que o alinhamento seja mantido, antes da fixação final (aparafusamento à mesa ótica), como é possível observar na Figura 11.



Figura 11- Base giratória com ímãs na sua base inferior. Preço sem VAT a partir de 26,10€ [11].

### 2.3.9. Garfos de fixação e respetivos adaptadores

Este tipo de fixação requer o recurso a adaptadores, que estão apresentados na Figura 12. Estes adaptadores aparafusam diretamente na parte inferior da guia vertical ou do respetivo suporte.



Figura 12- Adaptador que permite a fixação da guia vertical ou respetivo suporte recorrendo a um garfo. Preço do adaptador sem VAT: 8,19€ [12].

Este adaptador irá permitir a utilização dos garfos de fixação apresentados na Figura 13. Possuem três pontos de contacto fornecendo uma elevada estabilidade de fixação.



Figura 13- Garfo de fixação. Preço sem VAT a partir de 7,88€ [12].

Os garfos de fixação possuem uma ranhura para parafusos M6. Além disso, tal como a base giratória e magnética, apresentada anteriormente, o garfo pode ser rodado 360°. Estes dois aspetos aumentam a flexibilidade aquando da montagem, pois permitem ao utilizador a escolha do furo mais conveniente na mesa ótica. Na Figura 14, encontra-se um exemplo de aplicação deste tipo de fixação.



Figura 14- Exemplo de aplicação do garfo de fixação e respetivo adaptador [12].

### 2.3.10. Retentores de posição da base

Os retentores de posição são usados para realinhar as bases que foram removidas de um sistema ótico. Funcionam como um marcador na superfície da mesa ótica e os três pontos brancos marcados na superfície correspondem aos três pontos de contacto (Figura 15).



Figura 15- Retentor de posição. Preço sem VAT: 8,10€ [10].

### 2.3.11. Sistemas de gaiola

Os sistemas de gaiola permitem a montagem de componentes óticos ao longo de um eixo ótico comum. Estes sistemas permitem o fácil alinhamento dos componentes, diminui o tempo de montagem e aumenta a portabilidade. Na Figura 16, é possível observar um exemplo deste tipo de sistema.

Estes sistemas estão disponíveis em várias dimensões e existe uma gama alargada de acessórios, de forma a ser possível a inclusão de uma grande variedade de componentes.

Um sistema de gaiola pode ser integrado numa mesa ótica utilizando guias verticais de montagem.

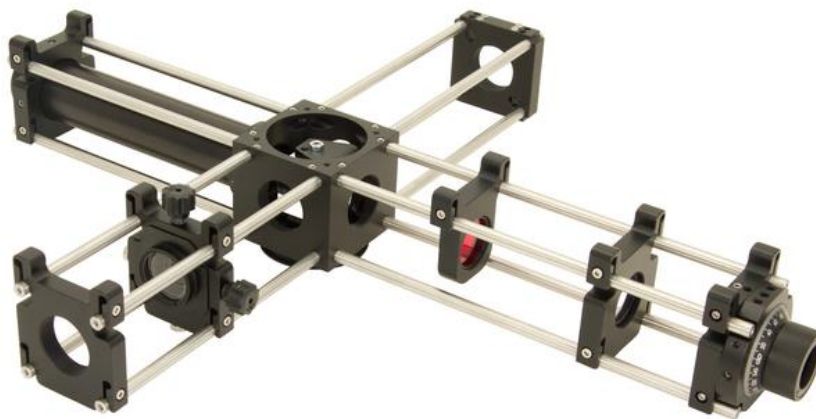


Figura 16- Sistema de gaiola. Preço varia consoante os componentes utilizados no sistema [13].

### 2.3.12. Suportes óticos fixos

Em aplicações em que não é necessário um ajustamento cinemático, os suportes óticos fixos são uma solução de baixo custo e viável para a fixação de componentes óticos. São úteis em aplicações nas quais a direção do feixe é controlada por outro componente.

É possível agrupar os suportes óticos fixos em duas categorias: ajustáveis e não ajustáveis. A grande desvantagem dos suportes não ajustáveis é a falta de versatilidade, pois ao não oferecer qualquer tipo de ajuste, restringe o uso do suporte a componentes com dimensões compatíveis.

#### 2.3.12.1. Suportes para lentes fixo não ajustáveis

Estes suportes (Figura 17) permitem a montagem de lentes de uma forma fácil e rápida. O roscado interior juntamente com um anel de retenção permitem segurar a lente com uma grande estabilidade, sem a danificar.

Estes suportes podem ser facilmente integrados numa guia vertical, recorrendo ao furo roscado existente.



Figura 17- Conjunto de suportes para lentes não ajustáveis com vários diâmetros. Preço sem VAT a partir de 15,80€ [14].

#### 2.3.12.2. Suportes para lentes com diâmetro ajustável

Este tipo de suporte (Figura 18) é ideal para a montagem de lentes com dimensões não-normalizadas. As três pinças de fixação podem ser ajustadas individualmente de forma a ser possível fixar lentes com formatos menos comuns. A lente é fixa através do aperto manual dos três parafusos.

Cada suporte inclui um furo roscado na sua base de forma a permitir sua a montagem direta nas guias verticais.



Figura 18- Suporte para lentes com diâmetro ajustável montado numa guia vertical. Preço sem VAT a partir de 39,00€ [15].

#### 2.3.12.3. Suportes em V com altura regulável

Estes suportes (Figura 19) de fácil uso permitem a fixação de lentes numa vasta gama de diâmetros e espessuras. Os parafusos laterais permitem o ajuste em altura, enquanto que o do topo permite a fixação dos componentes.

A espessura destes suportes é bastante reduzida o que os torna ideais para montagens compactas.

Além da fixação de lentes, o formato em V permite a fixação de componentes cilíndricos, como por exemplo, lasers.

O furo roscado na base permite a rápida montagem destes suportes numa guia vertical.



Figura 19- Suporte em V com altura regulável. Preço sem VAT a partir de 104,00€ [16].



#### 2.3.12.4. Plataformas compactas para montagem em guia vertical

Estas plataformas são ideais para a montagem de pequenos componentes óticos, tais como prismas, divisores de feixe, etc.

O facto de serem compactas com dimensões reduzidas torna-as uma excelente solução para configurações onde existam limitações de espaço.

O adaptador PCMP (plano) ou PCMV (em V) apresentados na Figura 20 fornecem uma superfície de montagem estável. Este adaptador é roscado na guia vertical roscada.



Figura 20- Plataforma compacta para montagem em guia vertical e respetivos adaptadores. Preço sem VAT da plataforma e um adaptador: 48,15€ [17].

#### 2.3.13. Suportes óticos cinemáticos

##### 2.3.13.1. Suportes cinemáticos para componentes óticos multi-eixo

No mercado existe uma grande variedade de suportes cinemáticos. Existem versões com 2, 3, 5 e até mesmo 6 graus de liberdade, com diferentes dimensões, gama de posicionamento, sensibilidade e robustez. De acordo com as suas necessidades, o utilizador terá que escolher o suporte que melhor se adapta a estas, não esquecendo fatores essenciais, como por exemplo, espaço de montagem e orçamento disponíveis.

Como a oferta é demasiado grande, apenas serão apresentados três suportes da marca Newport com dois, três e cinco eixos de posicionamento (Figura 21). O modelo com dois eixos fornece posicionamento ortogonal. O modelo com três eixos adiciona o posicionamento ao longo do eixo ótico. Por último, o modelo de cinco eixos acrescenta rotação segundo os dois eixos ortogonais perfazendo assim os cinco graus de liberdade independentes, que permitem o posicionamento preciso de um componente ótico.



Figura 21- Suporte cinemático para componentes óticos de 2, 3 e 5 eixos de posicionamento, respetivamente. Preço sem VAT a partir de 292,00€ [18].

Estes suportes incluem uma base que permite o aparafusamento direto a uma mesa ótica. Esta base pode ser removida, tornando o suporte mais compacto.

A abertura central contém anéis de retenção que permitem a incorporação de um suporte auxiliar adequado para a fixação não só de lentes simples mas também de outros componentes óticos (Figura 22).



Figura 22- A abertura central permite a fixação de outros componentes óticos, para além das lentes simples, com o recurso a um suporte auxiliar adequado [18].

### 2.3.13.2. Suportes para espelhos

Os suportes para espelhos são usados para fixar um espelho na posição desejada e permitem a inclinação deste com grande precisão. As montagens com suportes cinemáticos são a solução mais popular. Os suportes tipo gimbal permitem a rotação do espelho sem a translação deste. Para aplicações com uma elevada exigência, a nível de resolução, existem os suportes com sensores piezoelétricos, operados com atuadores e um controlador.

A oferta de suportes cinemáticos é grande, de forma a cumprir todos os requisitos do utilizador, em termos de sensibilidade, gama de ajustamento angular e dimensões do espelho que se pretende utilizar. Na Figura 23 são apresentados dois tipos de suporte, um para espelhos circulares e outro para espelhos retangulares. Com o recurso a um adaptador externo,

é possível, em alguns dos suportes, a montagem de outros componentes óticos, como por exemplo, um díodo laser. Estes suportes permitem o ajustamento angular segundo dois eixos. Em alguns modelos foi acrescentada a translação segundo o eixo ótico, obtendo assim três graus de liberdade.



Figura 23- Suporte cinemático para espelhos circulares e retangulares, respetivamente. Preços sem VAT a partir de 63,72€ para os circulares e 59,31€ para os retangulares [19, 20].

Os suportes tipo gimbal (Figura 24) proporcionam a rotação do espelho sem que haja translação deste. Este aspeto é muito importante em aplicações que não se pretenda que o percurso ótico se alargue ou encurte após cada ajuste. Este suporte permite o posicionamento de 360° segundo dois graus de liberdade. Alguns modelos providenciam também a translação do espelho segundo o eixo ótico.



Figura 24- Suporte tipo gimbal. Preço sem VAT: 241,20€ [21].

Os suportes com ajustadores piezoelétricos (Figura 25) são a melhor solução para aplicações extremamente rigorosas, que requerem constante monitorização e elevada estabilidade de alinhamento. Estes são compactos, possibilitando a sua montagem numa área

reduzida. Além disso, o atuador apenas se move quando é aplicada tensão aos piezos, garantindo que quando o sistema se encontra desligado, o espelho mantém a sua posição [22].



Figura 25- Suportes com ajustadores piezoelétricos e respectivos atuadores. Preços sem VAT a partir de 921,00€ [23].

#### 2.3.14. Plataformas multi-eixos

O mercado oferece uma ampla variedade de plataformas com dois, três, quatro, cinco e seis eixos, para utilização em aplicações de posicionamento. Como tal, irão ser apresentados apenas as plataformas de seis eixos pois são a solução mais versátil e mais complexa.

A plataforma de posicionamento de seis eixos (Figura 26) é ideal para o uso em aplicações que requerem resolução na ordem do sub-micron, porém, com a inclusão de piezos, é possível alcançar resoluções na ordem do nanómetro.

A inclusão de piezos é opcional e o controlo destes pode ser efetuado por controladores em malha aberta ou fechada. Os controladores em malha aberta são ideais para aplicações que requerem posicionamento com resolução até 20 nanómetros. Os controladores em malha fechada aumentam a resolução para 5 nanómetros e podem ser usados para compensar, por exemplo, a histerese e/ou a variação térmica inerente a todos os elementos piezoelétricos.

Todos têm, no entanto, uma enorme desvantagem, que é o diminuto curso possível de movimento total, obrigando a que o sistema esteja já colocado, praticamente, na sua posição física final, e que necessite só e unicamente de reduzíssemos cursos de ajuste.



Figura 26- Plataforma multi-eixo com posicionamento segundo seis eixos. Preços sem VAT a partir de 5,328.00€ podendo chegar aos 10.782,00€ para plataformas com piezos em malha fechada [24].

## **2.4. Sumário**

Nesta seção foi possível observar a grande diversidade de mesas óticas e componentes optomecânicos, numa vasta gama de dimensões, segundo sistema métrico e inglês. De realçar o custo de cada um destes elementos, que obrigam a um elevado investimento, aquando da construção de um sistema ótico de raiz, por mais simples que este seja. Para uma escola secundária, sendo esta uma entidade com orçamentos muito reduzidos, é impossível a construção de um simples sistema ótico, que poderia ser utilizado durante as aulas de forma a tornar estas muito mais didáticas e intuitivas. Como tal, este trabalho visa colmatar esta dificuldade.

### 3. Soluções Desenvolvidas

#### 3.1. Introdução

Ao longo deste capítulo, são apresentadas as soluções desenvolvidas no decorrer deste trabalho, bem como as respectivas vantagens e desvantagens apresentadas por cada uma destas. Alcançou-se uma versão final que colmatou as desvantagens apresentadas pelas versões antecedentes.

O projeto e desenho das soluções apresentadas tentaram cumprir os objetivos fulcrais desta tese, que incluem a construção de um suporte universal, de elevado desempenho e baixo custo. Além disso, estes suportes poderão, certamente, ser utilizados em escolas, o que requer que a sua montagem seja simples e rápida. A fiabilidade é outro aspeto importante, por forma a permitir a correta fixação de um componente ótico, sem que este seja danificado.

#### 3.2. Primeira Solução

O primeiro passo foi o desenho da peça, recorrendo a uma ferramenta de modelização 3D, denominada SolidWorks (Figura 27).

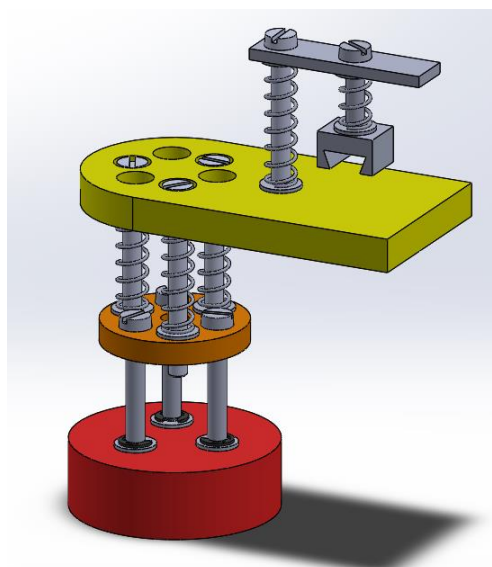


Figura 27- Modelização da primeira solução em SolidWorks.

### 3.2.1. Ligação entre a peça inferior e a peça central

A ligação entre estas duas peças recorre ao uso de três parafusos M4x40 e uma solução de fixação algo “engenhosa”. A utilização de um torno mecânico permitiu o sangramento de cada um dos parafusos, que podem ser observadas na Figura 28. No anexo A, é apresentado um desenho detalhado deste sangramento.



Figura 28- A utilização de um torno mecânico permitiu o sangramento do parafuso.

Este rebaixamento, em cada um dos parafusos, permitiu a inclusão de freios, parte essencial da solução de fixação utilizada. Os freios foram, posteriormente, inseridos nas ranhuras por pressão. As molas de compressão, utilizadas entre as anilhas (Figura 29- lado esquerdo), contrabalançam as folgas.

Com esta solução, é efetuada a ligação entre a peça inferior e a central. No entanto, permite que, com o aperto/desaperto dos parafusos que fazem a ligação da peça inferior à peça central, esta última seja inclinada segundo três eixos diferentes, dependendo do parafuso que está a ser apertado/desapertado. A peça superior possui três furos passantes, com 8 mm de diâmetro e alinhados com os da peça inferior, de forma a permitir ao utilizador apertar e desapertar convenientemente os parafusos, que fazem a ligação entre a peça inferior e a peça central.



Figura 29- Solução utilizando molas entre as duas anilhas (destacadas na figura com o número 1) para redução de folga na figura da esquerda; ligação completa da peça inferior à peça central na figura da direita.



### 3.2.2. Ligação entre a peça central e a peça superior

A ligação entre estas duas peças (Figura 30) é feita, tal como na anterior, através do uso de três parafusos M4. Esta ligação é parte fulcral do funcionamento de todo o sistema. Os furos na peça superior são roscados e na peça central são passantes, permitindo, desta forma que, de acordo com o aperto de cada um dos parafusos, a peça superior tenha diferentes inclinações. Como existem três parafusos, é possível obter três diferentes inclinações. Além da inclinação, os parafusos permitem o controlo em altura do suporte. Foram incluídas três porcas, coladas a cada um dos três parafusos, de forma a que rodem solidárias com os parafusos e evitem que, caso o utilizador desenrosque os parafusos em demasia, o suporte não se desmonte. As molas de compressão são utilizadas para contrabalanço das folgas.

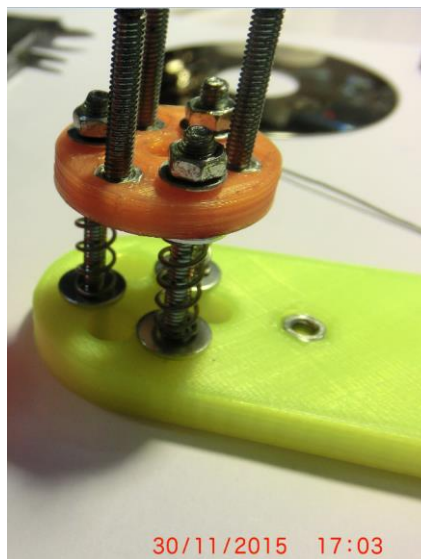


Figura 30- Ligação entre a peça central e a peça superior (foto invertida).

### 3.2.3. Solução para furos roscados

A impressora utilizada para imprimir as peças tem dificuldade na produção de furos roscados em peças com espessura reduzida, tal como é o caso. De forma a contornar este problema, é feito um encastramento para uma porca (Anexo B para mais detalhes), nos furos que se deseje roscado. As porcas são inseridas por calor no respetivo encastramento para, posteriormente, os parafusos roscarem nestas (Figura 31).

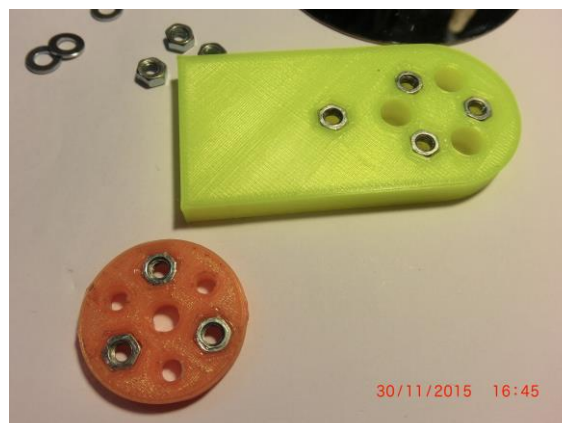


Figura 31- Porcas inseridas por calor nos respectivos encastramentos.



#### 3.2.4. “Garfo” para fixação dos componentes

Com as peças montadas e interligadas, falta apenas um mecanismo que permita fixar os diversos componentes óticos. Como tal, foi criado um “garfo” e um suporte para este, em acrílico, visto serem peças relativamente simples e rápidas de reproduzir. Este suporte possui dois furos passantes, que permitirão a ligação deste à peça superior, recorrendo a um parafuso M4x40, que rosca no furo presente na peça superior. O furo, no suporte, ao ser passante, permite a rotação deste na direção desejada. O “garfo” possui um furo roscado que permite a sua fixação através do uso de um parafuso M4x20. O uso das molas de compressão reduz qualquer folga que possa existir (Figura 32).

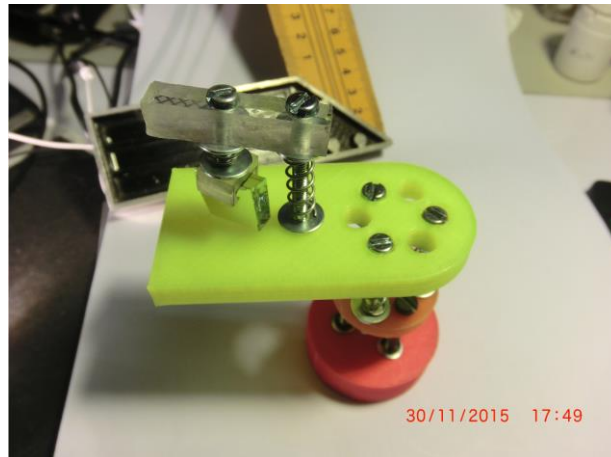


Figura 32- Mecanismo para fixação de componentes óticos.

#### 3.2.5. Fixação do suporte ao exterior

A fixação deste suporte, ao exterior, utiliza três ímãs de neodímio-ferro-boro, colados na peça inferior, como mostrado na Figura 33. Estes ímãs fornecem uma força de fixação extremamente elevada sobre bases com propriedades ferrosas. A inclusão de ímãs como solução de fixação permite que o utilizador, deslize o suporte sobre a base metálica, até à posição desejada. Este aspeto diminui significativamente o tempo de montagem e alinhamento de um sistema ótico e permite obter os seis graus de liberdade (deslizamento sobre a mesa segundo dois eixos ortogonais, controlo em altura e inclinações segundo três eixos diferentes).

De forma a permitir a correta fixação do suporte, este tem que ser utilizado sobre uma base metálica.

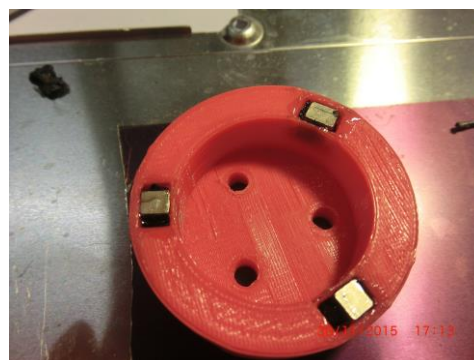


Figura 33- Ímãs de neodímio-ferro-boro colados na peça inferior.

### 3.2.6. Vantagens

Este suporte foi totalmente montado recorrendo a elementos básicos (parafusos, anilhas, porcas, molas) e à impressão 3D das peças. Como tal, o seu preço total é extremamente baixo, o que o torna muitíssimo apelativo para aplicações com orçamentos reduzidos.

A base, com os ímãs, permite a colocação destes suportes sobre qualquer mesa metálica, como é o caso da grande parte das mesas óticas comerciais. A fixação por ímãs fornece força suficiente para a fixação dos componentes óticos e, em simultâneo, permite que o utilizador deslize o suporte, segundo dois eixos ortogonais, concedendo um rápido reposicionamento e reduzindo, significativamente, o tempo de montagem e alinhamento do sistema ótico. Estes dois eixos ortogonais, juntamente com o ajustamento em altura e inclinação segundo três eixos diferentes, conseguida através do aperto/desaperto dos parafusos, possibilita, em cada suporte, seis graus de liberdade, extremamente intuitivos, o que permite o uso por parte de qualquer utilizador, sendo este profissional ou inexperiente (Figura 34).

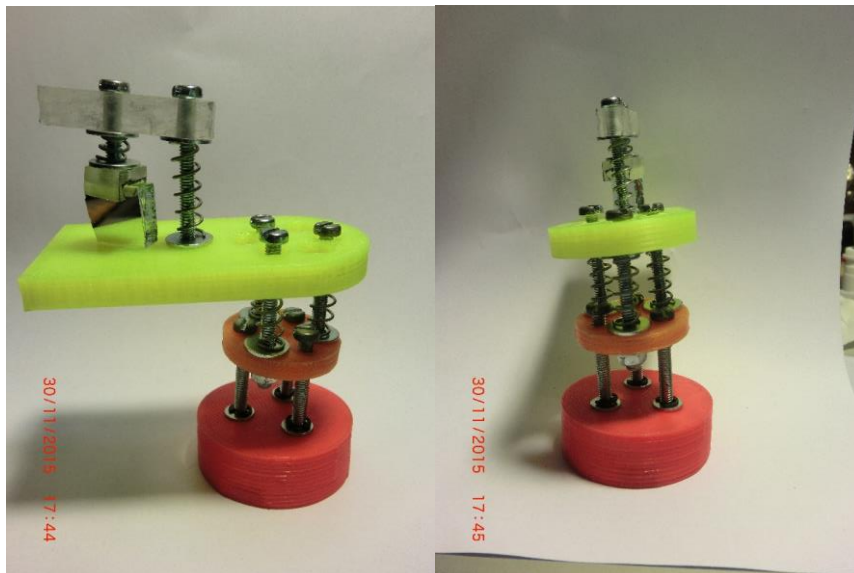


Figura 34- Suporte montado fixando um espelho de superfície. De realçar as inclinações possíveis de alcançar que ultrapassam qualquer necessidade que o utilizador possa exigir.

### 3.2.7. Desvantagens

Numa tentativa de reduzir ainda mais os custos de cada suporte, tentou-se replicar o suporte totalmente em acrílico (Figura 35). Os furos, separados por ângulos de 60 ou 120°, juntamente com o formato circular das peças, dificultam o processo de marcação exigindo a utilização de, por exemplo, um transferidor e um compasso. O formato das peças acaba por dificultar o processo de corte e exige elevada precisão de forma à obtenção de peças minimamente circulares.

O fato das três peças, que constituem um suporte, serem diferentes, torna-se um aspeto extremamente negativo aquando da produção em grande escala.



Figura 35- Tentativa de replicação em acrílico. De realçar a dificuldade de obter peças minimamente circulares bem como a dificuldade de marcação dos furos.

### 3.3. Segunda Solução

A segunda solução, foi pensada e focada para a construção utilizando acrílico, tentando eliminar as dificuldades que surgiram com a primeira solução. As interligações, entre as peças, são muito similares às apresentadas anteriormente, na primeira solução. Tal como na primeira solução, a fixação do suporte é feita através de magnetes, colados na peça inferior, e a regulação em altura, bem como a inclinação segundo três eixos diferentes, é feita através do aperto/desaperto dos parafusos.

O acrílico é um material muito barato e pode ser obtido, por exemplo, em ecrãs de computador avariados, permitindo assim aumentar a sua reciclagem. Desta forma, a segunda solução, ao ser totalmente construída em acrílico, permite que o preço total do suporte seja ainda mais baixo, em comparação com a primeira solução (Figura 36).



Figura 36- Suporte construído, inteiramente, em acrílico.

#### 3.3.1. Marcação de furos e medidas

De forma a simplificar a marcação de furos e o processo de corte, as peças circulares foram substituídas por peças quadrangulares (Figura 37). Assim, com uma simples régua e marcador, é possível marcar todos os furos existentes, de uma forma simples e extremamente rápida. De notar também, que as peças são iguais, excetuando a peça superior, que tem o dobro do comprimento das outras (80 mm).

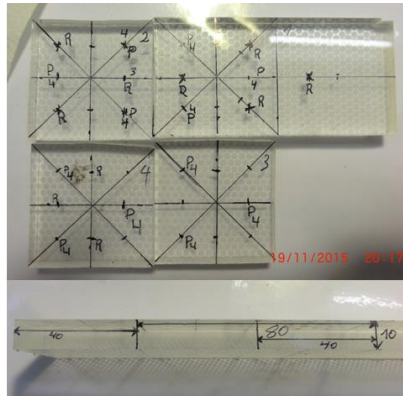


Figura 37- Peças com marcação dos respectivos furos e dimensões.

### 3.3.2. Equipamentos e cuidados necessários no trabalho em acrílico

O acrílico é um material difícil de furar e cortar, requerendo a utilização de máquinas adequadas, com potência suficiente. Além disso, é exigido, ao utilizador, alguma experiência e concentração, aquando deste processo, de forma a evitar, por exemplo, furos enviesados. Na criação de furos roscados, tem que existir particular atenção, de forma a não sobreaquecer o acrílico, danificando o roscado, que é pretendido obter.

O corte do acrílico acaba por retirar a superfície transparente e lisa, deixando-a opaca e rugosa (Figura 38- lado esquerdo). Como tal, é exigido, após o corte, um acabamento final, usando uma lixa adequada para o material em questão (Figura 38- lado direito).



Figura 38- O aspeto da peça antes (figura da esquerda) e após acabamento final (figura da direita).

### 3.3.3. Vantagens da utilização do acrílico na construção do suporte

A principal vantagem da utilização do acrílico, face à impressão 3D, é o custo. O acrílico, como já referido, pode ser obtido de ecrãs de computador avariados, reutilizando-o e evitando o desperdício deste material. Este aspeto é particularmente interessante em escolas dado que, muitas das vezes, existem inúmeras arrecadações repletas de ecrãs avariados, assim obtendo o acrílico a partir destes ecrãs, não há necessidade de comprar o material, reduzindo o investimento necessário para o fabrico de um suporte.

A furação em acrílico permite o fabrico de furos roscados. No entanto, exige alguma perícia por parte do operador de forma a evitar o sobreaquecimento do acrílico e dano permanente no furo.

#### 3.3.4. Desvantagens do trabalho com acrílico

Como anteriormente referido, o corte e a furação do acrílico não é uma tarefa simples e requer a utilização de máquinas adequadas para o efeito, exigindo que o operador as conheça e tenha uma certa experiência. A falta de experiência e de concentração pode levar à obtenção de furos enviesados, tornando as peças inutilizáveis (Figura 39). É requerido também, ao operador, particular atenção na obtenção de furos roscados, devido à elevada possibilidade de sobreaquecimento do acrílico, danificando por completo o roscado que se pretende obter.

O acrílico exige, no final, um polimento e acabamento de forma a obter o aspeto transparente e liso, apresentado na Figura 39.

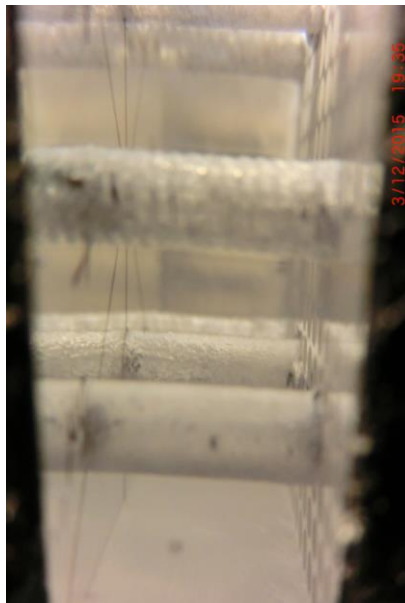


Figura 39- Furos enviesados numa base em acrílico.

#### 3.4. Terceira Solução (Solução Final)

A solução final foi pensada de forma a permitir, ao utilizador, a construção de uma imensa variedade de suportes, sem limitações em termos de imaginação, dimensões e necessidades, com apenas a forma física de uma peça.

A interligação entre as peças, pode ser feita recorrendo a elementos básicos de ligação (parafusos, anilhas, porcas, etc.), tal como acontece nas versões anteriores, ou então utilizar uma característica particular destas peças, que permitem interligar-se entre si.

De destacar a facilidade intuitiva dos 6 graus de liberdade, em cada suporte, proporcionada ao utilizador, tanto este seja inexperiente como profissional.

A fixação a elementos exteriores é proporcionada recorrendo a magnetes fixados na peça inferior, tal como acontecia com as versões anteriores. Este aspeto reduz, significativamente, o tempo necessário para o reposicionamento do suporte, durante o alinhamento, o que levará a uma redução temporal, extremamente significativa, da montagem/desmontagem/realinhamento de um sistema ótico.

Uma outra grande vantagem desta solução é a possibilidade da eliminação de vibrações externas ao sistema, bastando que todos os elementos desse mesmo sistema sejam montados, solidários, sobre os mesmos eixos.



#### 3.4.1. Peça única- a base da solução

O primeiro passo, desta última solução, foi a imaginação da ideia base. Seguidamente, procedeu-se ao desenho e projeto da peça única, base para toda a solução. As primeiras questões levantadas foram em relação às dimensões e diâmetros a utilizar. Como tal, foram feitas três versões, em SolidWorks, da peça, focada para utilização com elementos de ligação M3, M4 e M6 (Figura 40). Sendo estas peças para imprimir em 3D, adotou-se a versão M3, pois contém dimensões inferiores às restantes, tornando-se mais favorável em termos económicos, face às restantes. No anexo C, é apresentado um desenho detalhado da peça universal.

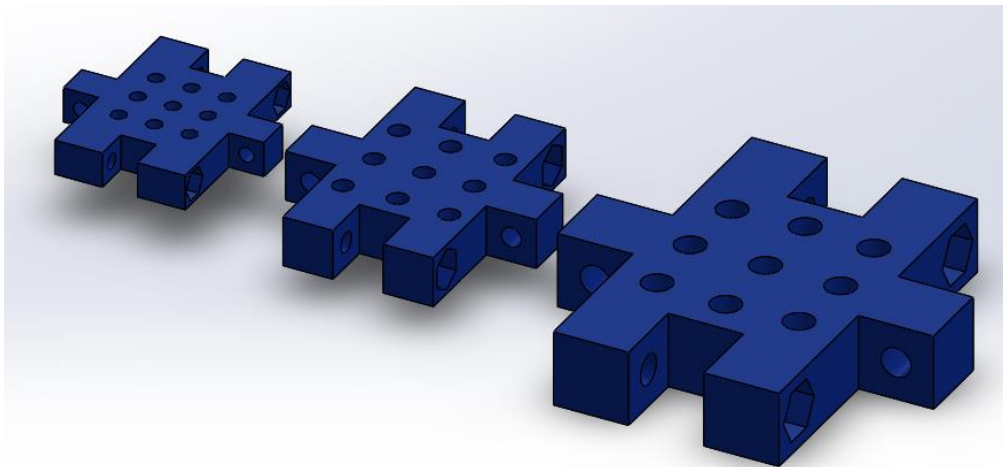


Figura 40- Peças desenhadas em SolidWorks (M3, M4 e M6, respetivamente).

Um outro aspeto a salientar é a diferente coloração das diferentes peças (Figura 41). Assim, permite que o utilizador saiba a posição de cada uma das peças. Ou seja, as peças pretas farão parte da base, pois contêm ímãs, que irão permitir a fixação do suporte. A peça central será constituída pelas peças azuis, pois contêm anilhas, em ambos os lados, de forma a permitir a integração de molas na ligação da base ao centro e do centro ao topo. A peça do topo será constituída pelas peças cor-de-laranja.

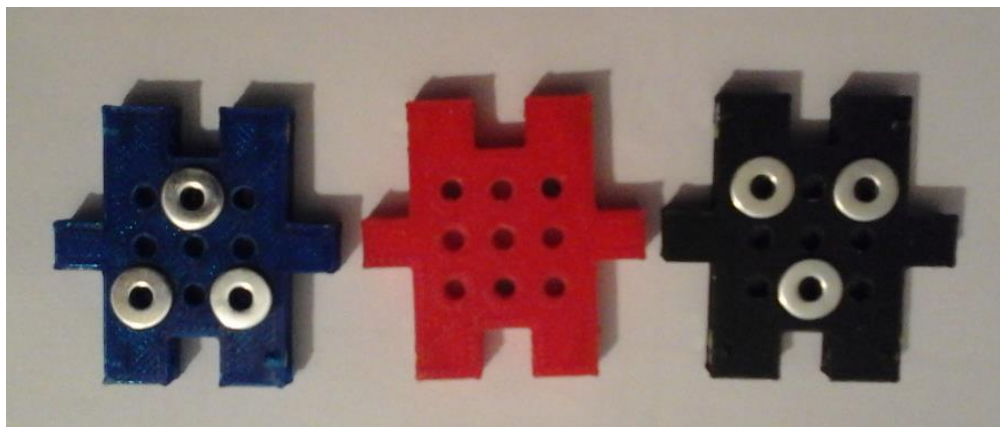


Figura 41- Diferente coloração das peças que permite ao utilizador a montagem de um suporte de uma forma rápida e intuitiva.

### 3.4.2. Interligação entre peças

A interligação entre peças pode ser feita através do uso de parafusos, tal como desenvolvido para as outras soluções, permitindo que o utilizador crie um suporte de acordo com as suas necessidades. Estas peças dispõem ainda de uma característica fundamental, que as torna mais interessantes, face às versões anteriores, pois permitem a ligação direta entre as peças, utilizando um sistema de encaixe simples, direto e mecanicamente estável (Figura 42).

Tal como nas versões anteriores, as ligações, entre duas peças, é feita através de três parafusos, em conjunto com três molas de compressão. Desta forma, é possível obter três rotações, segundo três eixos diferentes (coordenadas polares), de acordo com o aperto/desaperto, em cada um dos parafusos, juntamente com o ajustamento em altura.

A ligação direta entre as peças é conseguida através do encaixe das peças e fixação, recorrendo a um parafuso, que atravessará ambas as peças. Tal como demonstrado na Figura 42, as peças possuem dois furos, em cada um dos lados, que atravessam a peça totalmente e permitem que o parafuso rosque em ambas as porcas.

No Anexo D, é apresentado um desenho de definição do suporte apresentado na Figura 42, bem como uma lista de peças necessárias a esta montagem. Além disso, no Anexo E é apresentada a vista explodida do suporte.

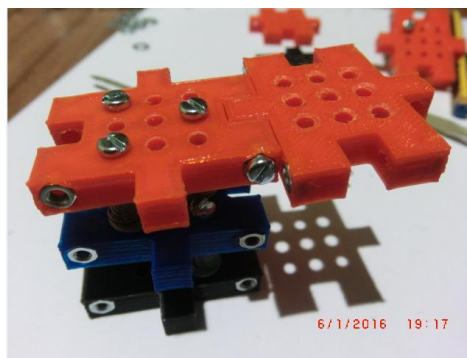


Figura 42- Exemplo de um suporte e dos diferentes tipos de interligação entre as peças.

### 3.4.3. Encastramentos para porcas

Tal como já referido anteriormente, a impressão 3D não permitiu a criação de furos roscados. Como tal, são criados, aquando do desenho da peça, encastramentos que permitem a inserção das porcas, tal como demonstrado no Anexo B, para a primeira solução. Desta forma, o parafuso irá rosquear na porca, em vez de rosquear na peça. De realçar o fato do parafuso poder ser inserido (roscado) tanto por um lado da porca como pelo outro, permitindo sempre o aperto.

As porcas foram inseridas nos encastramentos recorrendo a aquecimento local. Desta forma, foi necessária a utilização de um gerador de ar quente, de cariz profissional, para permitir o aquecimento adequado das porcas para, seguidamente, serem inseridas no respetivo encastramento.

Para garantir o correto alinhamento ortogonal das porcas em relação às faces das peças, roscau-se, totalmente, um parafuso em cada uma destas. Deste modo, a cabeça de cada um dos parafusos ficou encostada na superfície da peça, garantindo o alinhamento de todas as porcas.

Além das quatro porcas laterais, cada uma das peças está equipada com três porcas na sua superfície inferior, perfazendo um V. Este V pode ser invertido, ao rodar a peça 180°, de acordo com a posição dos furos roscados, pretendida pelo utilizador.

#### 3.4.4. Anilhas e respetiva função

As anilhas são utilizadas para fornecerem um apoio às molas de compressão. Além disso, evitam o desgaste da peça, devido à força exercida pela mola. Foram utilizadas anilhas M3 de aba larga (9 mm de diâmetro externo).

As peças pretas incorporam três anilhas na sua superfície superior; as peças azuis três anilhas na superfície superior e três na superfície inferior; as peças cor-de-laranja três anilhas na sua superfície inferior. As anilhas foram coladas às respetivas peças de forma a ficarem fixas.

#### 3.4.5. Fixação de componentes

A grande vantagem do modo de fixação utilizado por esta solução é que não há necessidade de recorrer a uma peça externa, diferente das que constituem o restante suporte. Como tal, é possível fixar, qualquer tipo de componente, utilizando um método tipo sanduiche (Figura 43), recorrendo a uma peça universal e três parafusos M3. O comprimento do parafuso é escolhido consoante as dimensões do componente a fixar.

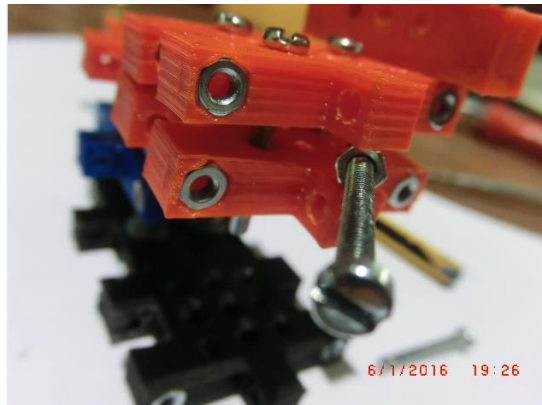


Figura 43- Exemplificação da fixação de uma porca.

#### 3.4.6. Fixação do sistema de suporte ao exterior

Tal como nas soluções anteriores, a fixação deste sistema de suporte, ao exterior, é efetuado recorrendo a magnetes de neodímio-ferro-boro. Cada uma das peças, neste caso específico e por opção de cor, pretas, incorpora três magnetes, colados na sua superfície inferior, utilizando os encastramentos para porcas não ocupados. A força de acoplamento magnético fornecida por estes é suficientemente elevada e adequadamente dimensionada, para a correta fixação dos suportes a uma base metálica. No entanto, permitem, ao utilizador, o deslizamento do suporte, sobre a base de apoio geral. Este aspeto é de extrema importância, com o intuito de reduzir significativamente o tempo de montagem e alinhamento de um sistema ótico completo. Além disso, acrescenta dois graus de liberdade cartesianos, segundo os dois eixos ortogonais, que juntamente com a possibilidade de controlo em altura e inclinações segundo três eixos polares, perfazem os seis graus de liberdade em cada suporte.

De forma a permitir a correta fixação do suporte, este deve ser utilizado sobre uma base metálica.



#### 3.4.7. Eliminação de vibrações

Sem qualquer limite imposto pela imaginação, existe a possibilidade da construção, de um único suporte, que albergue um sistema ótico completo em suportes múltiplos, de seis eixos de liberdade cada, todos interligados sobre uma mesma base comum, de agora em diante denominada de “célula ótica”. Este fato permite a eliminação de vibrações externas ao sistema, uma vez que todo este se encontra solidário, sob os mesmos eixos de vibração.

#### 3.4.8. Desvantagens

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas por esta solução esta acaba por apresentar algumas desvantagens, que se tornam irrelevantes face à sua versatilidade, utilidade e custo.

A introdução de todas as porcas acaba por ser um processo moroso, devido à necessidade de aquecimento prévio, de cada uma delas. Além disso, após introduzidas, há necessidade de garantir que estas estão adequadamente alinhadas, sendo necessário roscar, totalmente, um parafuso, em cada uma das porcas até estas se acamarem no leito, por arrefecimento lento. O processo de aquecimento exige particular atenção, de forma a evitar o aquecimento excessivo das porcas, que pode conduzir à danificação da peça ou a que esta fique com folga em demasia.

A colagem das anilhas, nas peças, apesar de ser um processo simples, acaba por ser um pouco moroso, tal como no caso das porcas.

Aquando do aperto/desaperto dos parafusos, numa fase inicial, antes de acamamento entre componentes, surge nos suportes torção indesejada. Este fato acaba por ser intensificado com o aumento do comprimento dos parafusos utilizados, no suporte o que faz prever ser necessário efetuar uma “rodagem de acamamento” inicial dos componentes mecânicos com movimento, antes do uso efetivo de precisão. Esta “rodagem de acamamento” contribuirá para a remoção de todas as imperfeições entre os componentes, permitindo o ajuste do passo entre os parafusos e as porcas, de forma a ficarem todos com tolerâncias semelhantes entre si, possibilitando a troca entre todos sem respeitar qualquer ordem. Além disso, de forma a eliminar essa torção, pode ser utilizado um veio que atravessa todo o sistema de suporte, desde a peça superior à inferior, usando para esse fim os furos livres. A utilização do veio não é obrigatória e é apenas necessária durante o processo de alinhamento e ajuste do suporte, sendo que pode ser removida após este processo.

### 3.5. Sumário

Neste capítulo foram apresentadas três soluções, sendo que a versão final acabou por ser a mais interessante. Com peças com uma forma física única, é possível a construção de um suporte universal, de baixo custo e uso muito intuitivo para qualquer componente optomecânico. Apesar das desvantagens enunciadas neste capítulo, estas acabam por se tornar irrelevantes face à versatilidade, utilidade e custo desta solução.

## 4. Demonstração de Funcionamento

### 4.1. Introdução

De forma a validar a viabilidade da solução final, é necessário provar que é possível a montagem de um suporte universal, recorrendo a uma única peça, tal como visto anteriormente. Como tal, foi construído um interferómetro de Michelson, utilizando os suportes, constituídos unicamente pelo sistema de peças já apresentada.

Neste capítulo, numa primeira fase, é apresentado o interferómetro de Michelson e todos os seus elementos constituintes. De seguida, é feita a descrição da montagem prática de um interferómetro de Michelson, em condições o mais adversas possíveis, utilizando duas soluções distintas. O capítulo termina com uma discussão dos resultados obtidos nos testes e com um breve sumário.

### 4.2. Interferómetro de Michelson

O interferómetro de Michelson é constituído por uma fonte de luz, dois espelhos, um divisor de feixe e um recetor ou uma lente que projetará sobre um alvo, visível a olho nu (Figura 44). A fonte de luz emite sobre o divisor de feixe, fazendo com que o feixe se divida em dois de igual intensidade. Um dos feixes será transmitido para o espelho 1 e é refletido chegando, posteriormente, ao recetor. O outro feixe, será transmitido para o espelho 2 e será refletido, acaçando também o mesmo recetor. Os dois feixes serão recombinados no recetor e poderá existir uma diferença de fase entre estes, devido à distância dos espelhos ao divisor de feixe poder ser diferente. No recetor, ocorrerá o fenómeno de interferência entre os dois diferentes feixes e irá ser obtido um padrão, que irá depender da diferença entre as distâncias dos espelhos e o divisor de feixe. De forma a tornar a experiência ainda mais interessante, um dos espelhos utilizados na experiência será móvel, de forma a permitir variar a frente de onda do respetivo feixe, alterando assim a diferença de fase existente entre os dois feixes [25].

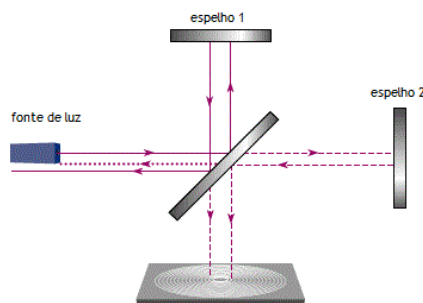


Figura 44- Interferómetro de Michelson [25].

### 4.3. Construção de um interferómetro de raiz

De forma a avaliar a performance dos suportes da solução final, foi construído um interferómetro, nas condições mais adversas que se poderiam encontrar, quer a nível de qualidade dos componentes óticos utilizados, quer a nível da base de apoio de todo o sistema e a nível do local escolhido para a montagem. Como tal, caso seja conseguida a construção de um interferómetro, nestas condições, já seria algo inovador e um aspeto extremamente positivo, que dificilmente pode ser alcançado, utilizando os componentes optomecânicos atualmente existentes no mercado quando sujeitos a estas condições extremamente adversas, para medições na ordem de grandeza molecular dos nanómetros.

#### 4.3.1. Fonte de luz

A fonte de luz utilizada foi um laser cujas características estão apresentadas na Figura 45. Este laser é bastante simples e pode ser obtido facilmente por cerca de 3,99€. O próprio laser já têm um controlador de controlo em corrente mas a qualidade e intensidade reduzida do feixe deixam mesmo muito a desejar. Serve, no entanto, para o propósito que foi desenvolvido, que é o de apontar uma luz vermelha para um texto a realçar, durante, por exemplo, uma apresentação, numa tela com iluminação natural reduzida, por forma a ser visível pelas pessoas assistentes à apresentação.



Figura 45- Características do laser utilizado no interferómetro.

#### 4.3.2. Alimentação do sistema

A alimentação do sistema é fundamental para o correto funcionamento do laser e de outros componentes eletrónicos que serão posteriormente apresentados. A alimentação utiliza uma fonte de 5VA, muito simples, que pode ser facilmente adquirida numa loja de eletrónica.

A tensão de alimentação do laser era realizada por três pilhas, de 1,5V cada, totalizando assim 4,5V. De forma a adaptar a tensão de saída, da fonte de alimentação, foi utilizado um díodo, retirado de uma placa pertencente a outro equipamento, que já não servia o propósito para o qual tinha sido desenvolvido, mas ainda contendo componentes eletrónicos funcionais. Foram obtidos 4,45V de tensão à saída da fonte, o que se revelou mais do que suficiente para alimentar corretamente o laser além de passar a ser uma proteção contra polarização errada da alimentação de todo o sistema.

De realçar que, com este sistema de alimentação, obtém-se uma elevada portabilidade, sendo possível a sua montagem em qualquer lugar, necessitando apenas de uma tomada de eletricidade tradicional.

#### 4.3.3. Espelho móvel

A mobilidade de um dos espelhos, utilizados no interferômetro, foi alcançada utilizando duas soluções. A primeira solução utiliza uma plataforma de deslocamento linear, com um grau de liberdade, juntamente com um micrómetro, ambos da Newport. A segunda solução utiliza um circuito eletrônico, que irá alimentar as bobinas de uma lente de CD-ROM, sendo que esta foi totalmente readaptada para o fim desejado.

A primeira solução utiliza, tal como já referido, uma plataforma linear, com um grau de liberdade, da Newport, cujo modelo é o 460A-X. Usou-se também um micrómetro, de forma a proceder à translação da plataforma, da mesma marca, cujo modelo é o BM17.25., com 25mm de curso e uma resolução de 10 micrómetro ( $\mu\text{m}$ ). Além disso, foi necessária a utilização de uma peça adaptadora da ThorLabs e um parafuso para fixação da Melles Griot (Figura 46). A peça, que está a suportar o espelho, é alumínio cortado de uma calha, em forma de L, à qual foi, posteriormente, colado o espelho. Além disso, possui um furo M6, de forma a permitir a fixação à plataforma.



Figura 46- Plataforma linear com micrómetro da Newport, peça adaptadora da ThorLabs e parafuso de fixação da Melles Griot.

A segunda solução consiste num simples circuito elétrico, que comanda as bobinas de uma lente de CD-ROM (Figura 47, à esquerda), movendo o espelho no direção do eixo ótico. Para tal, houve a necessidade de remover a lente existente no CD-ROM e substituí-la por um espelho. O produto final, já com o espelho inserido, encontra-se representado na Figura 47, à direita.

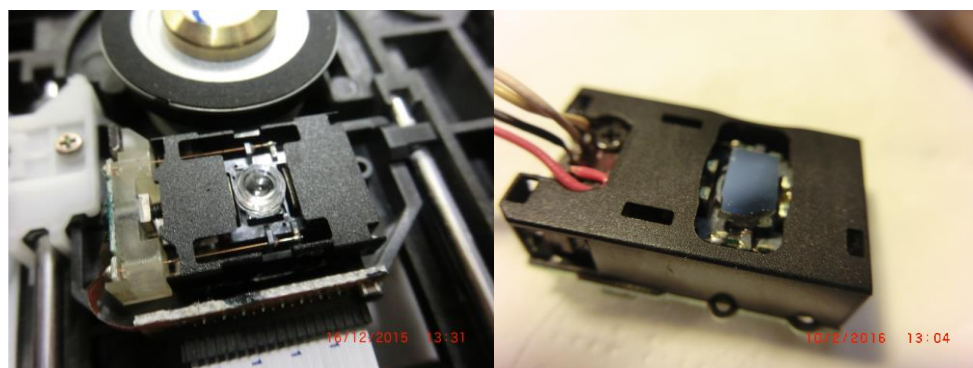


Figura 47- Na esquerda, uma lente removida de um leitor de CD-ROM. Na direita, o produto final, com a lente substituída por um espelho.

O passo seguinte foi a elaboração de um circuito de controlo, que permitisse controlar a translação do espelho, na direção do eixo ótico. O circuito, representado na Figura 48, utiliza elementos extremamente simples, obtidos em placas de circuitos reaproveitadas. O amplificador, por exemplo, foi obtido numa placa de CD-ROM. O controlo do movimento do espelho recorre a um potenciômetro, permitindo que este se mova nos dois sentidos, com o zero estabelecido para quando o potenciômetro se encontra na sua posição central.

A alimentação deste circuito é realizada, tal como já referido, pela fonte de alimentação que alimenta o laser.

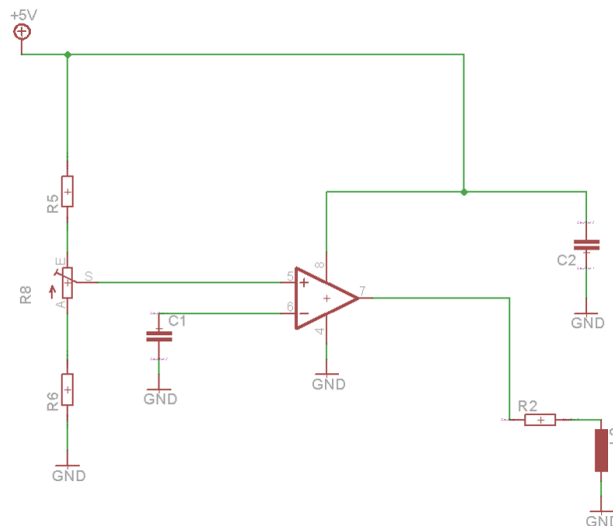


Figura 48- Circuito utilizado para acionar as bobinas da lente de CD-ROM, desenhado no software Eagle.

De forma a testar o correto funcionamento do potenciômetro, foi montado um motor, que gira nos dois sentidos (Figura 49). Desta forma, quando o potenciômetro se encontra na sua posição central, o motor terá que estar parado. Quando o potenciômetro se encontra numa das extremidades, o motor terá que rodar, num dos sentidos, à velocidade máxima.



Figura 49- Circuito eletrónico, ligado ao motor, de forma a testar o potenciômetro.

#### 4.3.4. Recetor dos dois diferentes feixes

Neste interferómetro, o recetor utilizado foi uma lente, retirada de uma lente de CD-ROM. Esta lente acaba por não ser a ideal pois está repleta de aberrações óticas, mas tendo em conta que são pretendidas as condições mais adversas possíveis, é uma ótima solução. É esperado que a lente permita, ao utilizador, a observação, a olho nu, do fenómeno de interferometria, entre os dois diferentes feixes.

#### 4.3.5. Base de apoio do sistema

De forma a garantir que as condições seriam as mais negativas possíveis, a base utilizada foi uma tampa metálica, de uma torre de um computador fixo (Figura 50).

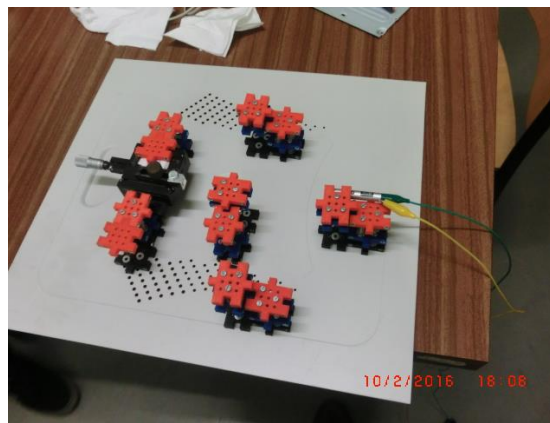


Figura 50- Sistema montado sobre uma tampa metálica, de uma torre de um computador fixo.

Esta tampa foi colocada sobre uma mesa de madeira. De realçar ainda que a tampa utilizada se deformava e não continha uma superfície inferior uniforme, sendo assim um teste ainda mais desafiador para a solução proposta (Figura 51).



Figura 51- Tampa apoiada numa mesa de madeira. De realçar o fato da superfície inferior da tampa não ser uniforme e se deformar.



#### 4.3.6. Discussão de testes

Os testes efetuados foram muito satisfatórios, face às condições adversas em que foram alcançados. A grande diferença entre as duas soluções apresentadas na Figura 53 foi a dificuldade de integração da plataforma da Newport em todo o sistema. Como apenas possui um grau de liberdade, não era possível controlar a altura do espelho, algo importante aquando do alinhamento de todo o sistema. Como tal, foi necessário adaptar dois dos sistemas de suportes desenvolvidos, de forma a ser possível esse controlo em altura e o correto alinhamento final de todo o sistema (Figura 52). De evidenciar a facilidade e adaptabilidade dos suportes, para fixar qualquer tipo de componente, de qualquer marca das existentes no mercado.

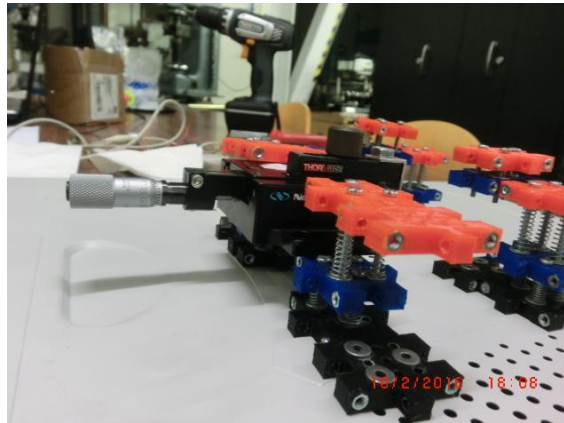


Figura 52- Plataforma fixa usando dois suportes.

A solução dois acabou por se revelar mais rápida a nível de montagem e alinhamento de todo o sistema, utilizando unicamente suportes constituídos pela peça apresentada previamente, neste documento (Figura 53, à direita). Analisando a figura 53 e as horas presentes nesta, é possível concluir que, em menos de uma hora, o interferómetro da solução um foi desmontado e foi montado o da solução dois, de raiz. Este fato permite realçar os aspetos positivos deste sistema, face aos existentes no mercado, que sobressai de imediato para qualquer profissional da área, que tem conhecimento acerca do quão demorado pode ser o alinhamento de um interferómetro, mesmo nas melhores condições. Neste caso, em condições extremamente adversas, foi possível a alteração do interferómetro, da solução um para a solução dois, alinhamento e discussão dos resultados em menos de uma hora.

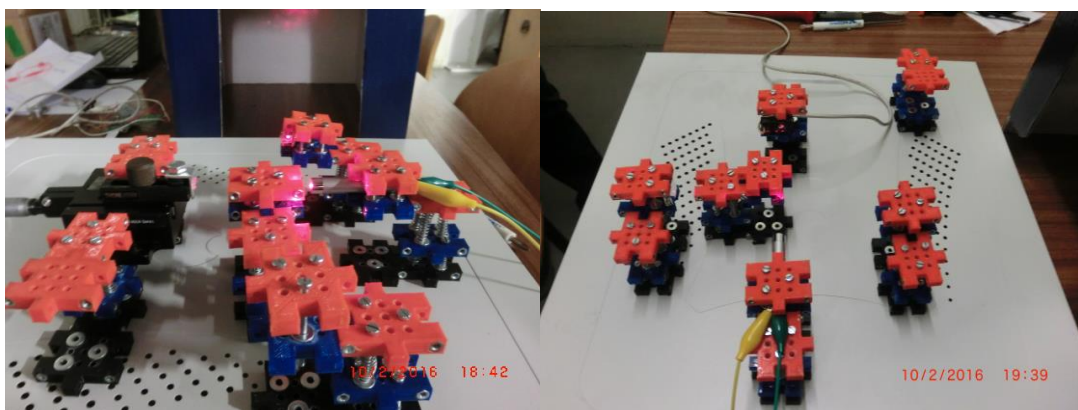


Figura 53- Solução um na figura da esquerda. A figura da direita apresenta a solução dois, constituída unicamente por suportes, usando a peça única apresentada neste documento.

O padrão de interferência acabou por ser muito semelhante entre as duas soluções. Tendo em conta as condições adversas, foi possível a obtenção de um padrão muito interessante (Figura 54). De realçar que a distância entre dois traços negros corresponde a meio comprimento de onda, que neste caso, analisando as características do laser (Figura 45), estará compreendido entre o intervalo de 318 e 330 nanómetro.

Devido às condições adversas, com a translação do espelho, não foi possível observar a variação da frente de onda, que iria conduzir a uma alteração na diferença de fase, existente entre os dois feixes. Será um aspeto para trabalhos futuros, com condições que o permitam observar.

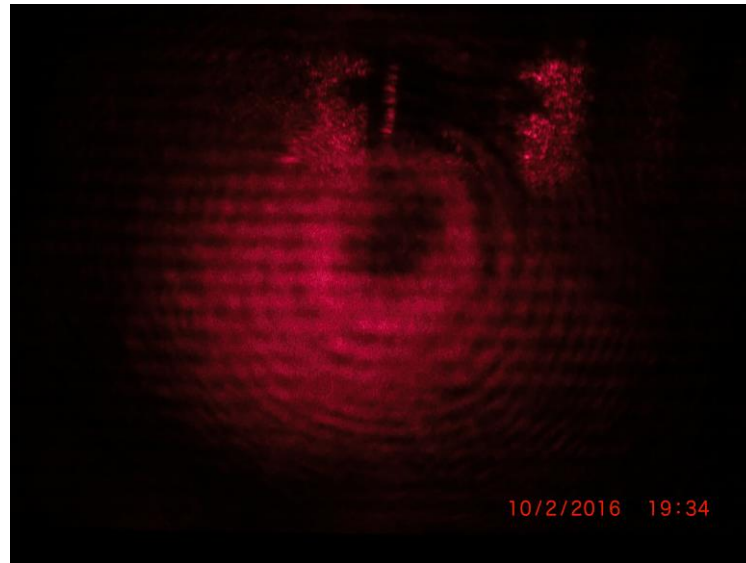


Figura 54- Padrão de interferência obtido com o interferómetro montado.

#### 4.3.7. Custo de todo o sistema

O custo de todo o sistema acaba por ser um dos aspetos mais positivos. Com um valor que ronda os 80 euros, é possível a montagem e construção de todas as peças que incorporam um interferómetro. Estes valores acabam por não ter em conta o tempo de montagem dos suportes, no entanto é possível concluir que o valor total será irrisório face ao investimento, que ronda os milhares de euros, necessário para a montagem de um interferómetro, com os componentes existentes atualmente no mercado.

#### 4.4. Sumário

Este capítulo descreveu a montagem prática de um interferómetro de Michelson, recorrendo a suportes constituídos unicamente pelas peças com uma forma física única, apresentadas neste documento. Com condições muito adversas e com um custo dos suportes de 80 euros, foi possível a obtenção de resultados extremamente satisfatórios.



## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1. Conclusões Finais

É possível concluir que os objetivos fulcrais desta dissertação foram totalmente atingidos. A solução final, recorrendo exclusivamente a uma peça com forma física única, possibilita a construção de suportes universais, de elevada fiabilidade, baixo custo, utilização intuitiva por parte de qualquer utilizador e uma precisão adequada para a utilização, maioritariamente, em escolas e entidades com orçamentos reduzidos.

A montagem de um sistema ótico, utilizando os suportes apresentados, reduz, muito significativamente, o tempo de montagem e alinhamento. Este fato deve-se à elevada mobilidade dos suportes pois, ao contrário da grande maioria dos componentes optomecânicos, estes suportes são fixos, à base de montagem, recorrendo a magnetes. Como tal, é possível o deslizamento do suporte, segundo os dois eixos cartesianos. Além disso, o suporte inclui o controlo em altura, juntamente com três rotações sobre três diferentes eixos, alcançando os seis graus de liberdade.

A peça única permite a criação de suportes, sem limitações da imaginação, que permitem a correta fixação de qualquer componente ótico. Além disso, é possível a eliminação de sinais perturbadores (vibrações, por exemplo), por associação de uma base comum a todos os suportes.

O custo extremamente baixo de cada suporte, permite a montagem de um sistema de baixo custo, sendo este um aspeto interessante em entidades com orçamentos muito reduzidos, como por exemplo, escolas.

Este trabalho terminou, com a construção de um interferómetro, nas condições mais adversas possíveis, nas quais não seria impossível montar um sistema ótico, recorrendo aos componentes optomecânicos atualmente existentes. No entanto, foi possível observar um padrão de interferometria bastante interessante.

## **5.2. Trabalhos Futuros**

Para trabalhos futuros, de destacar a importância da construção do interferómetro, sobre uma base que ofereça melhores condições, do que a anteriormente apresentada. Desta forma, seria possível a aquisição de resultados ainda mais interessantes e poderia ser possível observar a importância de um espelho móvel, no interferómetro, aspeto que não se pode evidenciar ao longo da experiência. Além disso, seria importante verificar a resolução que poderia ser alcançada com a solução dois (circuito elétrico) face ao micrómetro utilizado na solução um.

Um outro aspeto importante seria a automatização da produção da peça única de forma a baixar o custo de fabrico. Além disso, seria também importante a escolha de outros materiais para a peça.

De realçar também a importância de patentear a solução final, peça única, que permite a construção de suportes para componentes óticos sem qualquer limite a nível de imaginação, um aspeto extremamente inovador face às opções existentes no mercado, com as vantagens já enunciadas anteriormente.

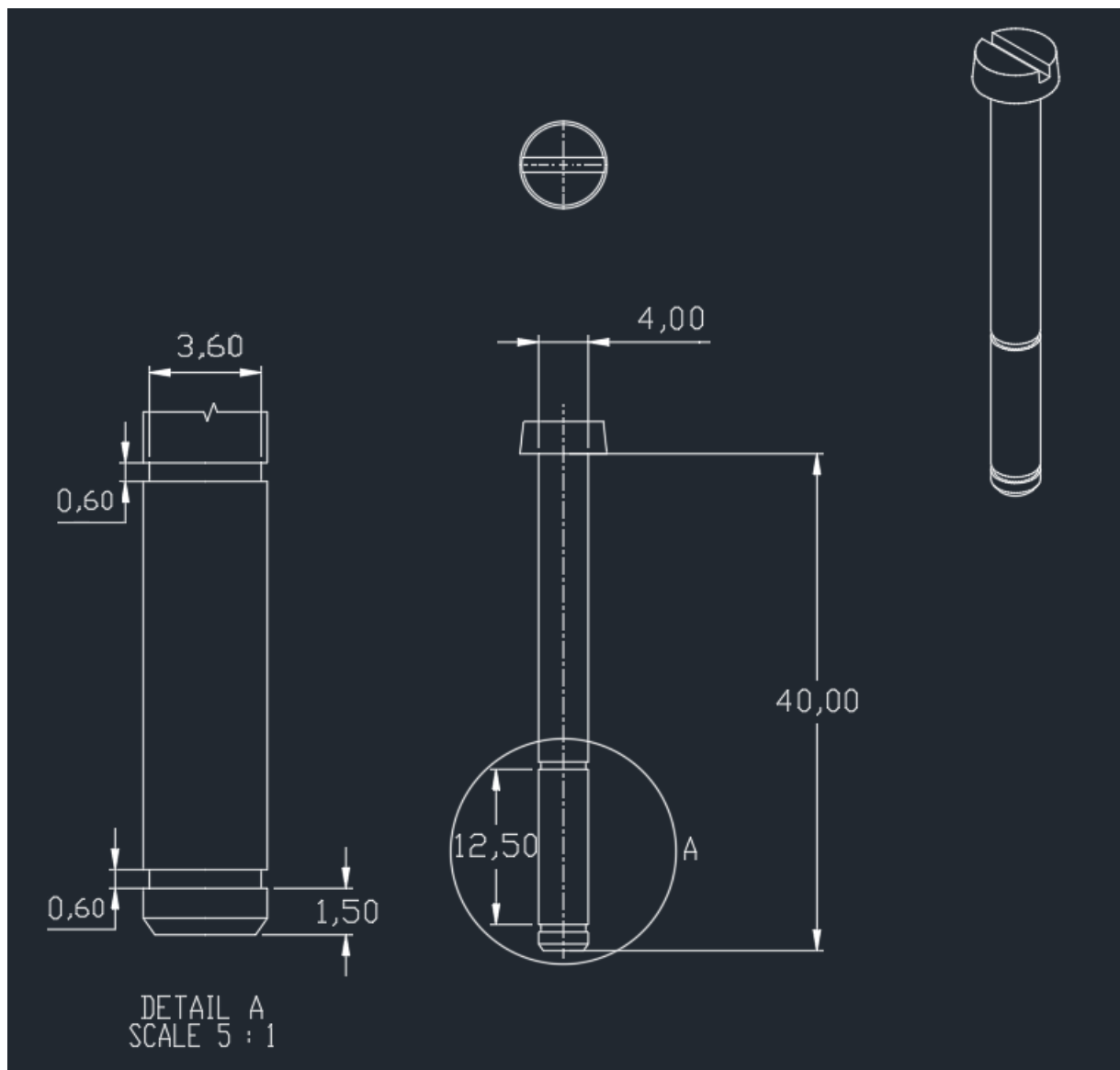
## Referências

- 1- Layard, A. H., 1853, “Discoveries in the Ruins of Nineveh and Babylon”, <https://archive.org/details/discoveriesinru00layagoog>, último acesso: novembro 2015.
- 2- Romer, H., 2009, “Theoretical Optics: An Introduction”, Wiley VCH; 2nd, Revised and Enlarged Edition.
- 3- Gertel, M., 1991, “Honeycomb Tables”, <https://www.google.com/patents/US5061541>, último acesso: novembro 2015.
- 4- Booth, W., 2010, “How to determine your equipment needs”, Laser Focus World p. 65-71.
- 5- Thor Labs, Optical Tables and Active Isolator Leg Bundles, [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=5930#](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5930#), último acesso: novembro 2015.
- 6- Marquardt, F. and Girvin, S.M., 2009, "Trend: Optomechanics", <https://physics.aps.org/articles/v2/40>, último acesso: dezembro 2015.
- 7- Newport, Optical Mounting Post, [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=M-SP-1](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=M-SP-1), último acesso: dezembro 2015.
- 8- Newport, No Slip Optical Post Holder, [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=M-VPH-3](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=M-VPH-3), último acesso: dezembro 2015.
- 9- Newport, Translating Optical Post Holders, <http://www.newport.com/Translating-Optical-Post-Holders/998897/1033/info.aspx>, último acesso: dezembro 2015.

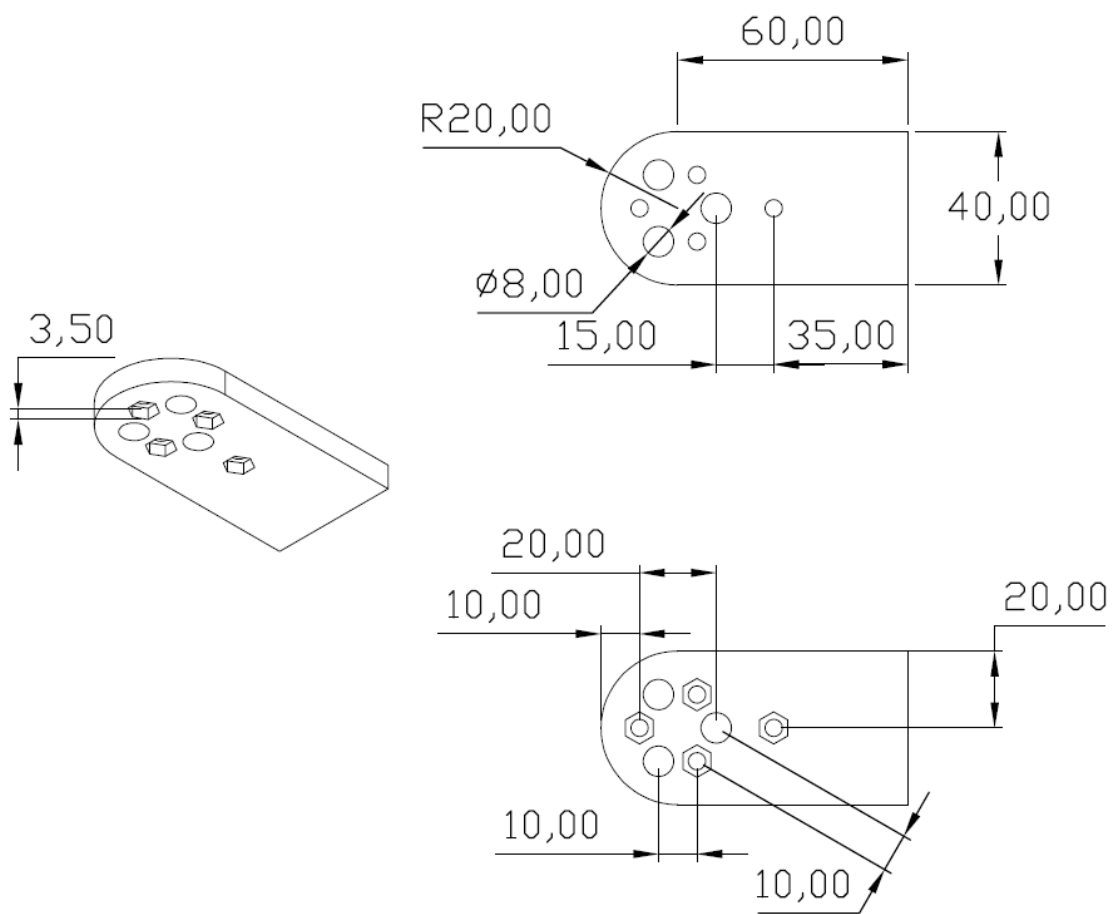
- 10- Thor Labs, Post Holder Bases,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=47](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=47), último acesso: dezembro 2015.
- 11- Thor Labs, Universal Post Holders,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1982](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1982), último acesso: dezembro 2015.
- 12- Thor Labs, Base Adapters and Clamping Forks,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=887](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=887), último acesso: dezembro 2015.
- 13- Newport, Optical Cage System, <http://www.newport.com/OpticsCage-Optical-Cage-System/1040698/1033/info.aspx>, último acesso: dezembro 2015.
- 14- Newport, Fixed Lens Mounts, <http://www.newport.com/Fixed-Lens-Mounts/144406/1033/info.aspx>, último acesso: dezembro 2015.
- 15- Newport, Universal On-Axis Lens Mounts, <http://www.newport.com/Universal-On-Axis-Lens-Mounts/144409/1033/info.aspx>, último acesso: dezembro 2015.
- 16- Newport, Universal Lens Mounts, <http://www.newport.com/Universal-Lens-Mounts/144411/1033/info.aspx>, último acesso: dezembro 2015.
- 17- Thor Labs, Fixed Compact Platform Mounts,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=9100](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9100), último acesso: dezembro 2015.
- 18- Newport, Precision Multi-Axis Lens Positioners, <http://www.newport.com/Precision-Multi-Axis-Lens-Positioners/270840/1033/info.aspx>, último acesso: janeiro 2016.
- 19- Thor Labs, Precision Kinematic Mirror Mounts,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=3](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3), último acesso: janeiro 2016.
- 20- Thor Labs, Kinematic Rectangular Optic Mounts,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=3971](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3971), último acesso: janeiro 2016.

- 21- Thor Labs, Gimbal Mounts,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=2857](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2857), último acesso:  
janeiro 2016.
- 22- Newport, Nanopositioners, <http://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/NanoCatalog.pdf>, último acesso: janeiro 2016.
- 23- Newport, Picomotor Piezo Optical Mounts, <http://www.newport.com/Picomotor-Piezo-Mirror-Mounts/918365/1033/info.aspx>, último acesso: janeiro 2016.
- 24- Thor Labs, 6-Axis NanoMax NanoPositioning Flexure Stages,  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1100](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1100), último acesso:  
janeiro 2016.
- 25- Halliday, D. et al., 2009, “Fundamentos de física”, Rio de Janeiro: LTC- Livros  
Técnicos e Científicos, 8ª edição.

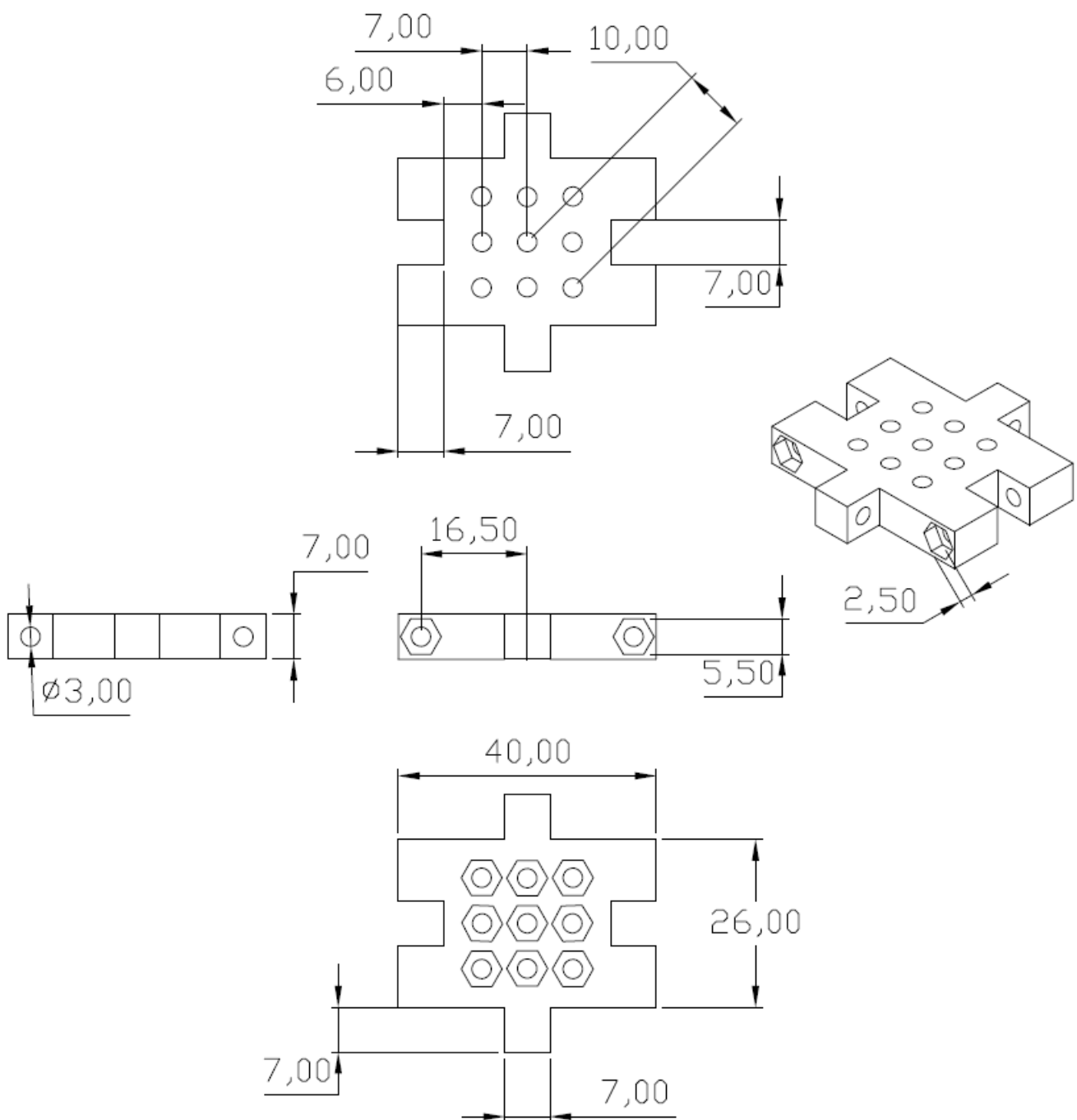
## ANEXO A: Sangramento de um parafuso



## ANEXO B: Encastramento para porcas detalhado

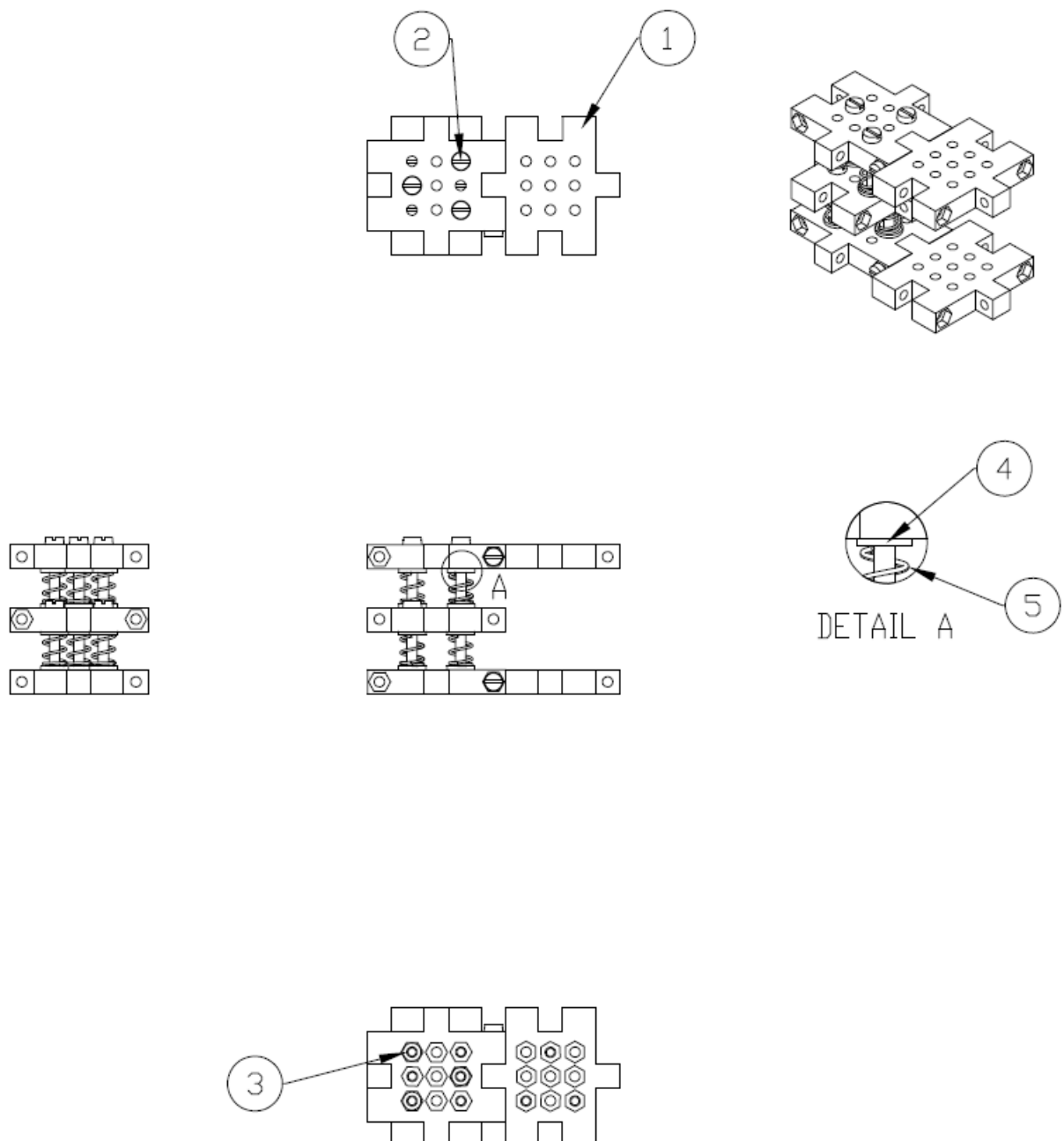


## ANEXO C: Peça única detalhada





## ANEXO D: Desenho de definição do suporte universal



NOTA: Para detalhes em relação às dimensões da peça universal, consultar o Anexo C.

**Lista de peças**

Número	Quantidade	Descrição
1	5	Peça universal
2	8	Parafuso com cabeça Cilíndrica ISO 1207 m3x25-4.8, passo normal
3	10	Porca ISO 4032 M3-A2
4	12	Anilha DIN 6903-3-180HV
5	6	Mola de compressão M3

## ANEXO E: Vista explodida do suporte

